

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

**Издатель:** Международная ассоциация  
«Сварка»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),  
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),  
З. А. Майдан (отв. секр.),  
Н. П. Алешин, В. Л. Венгринович,  
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,  
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,  
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,  
В. В. Ключев, А. А. Лебедев,  
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,  
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,  
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко,  
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,  
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,  
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

#### Адрес редакции

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

#### Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

#### Редактор

Т. В. Юштина

#### Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серода

Свидетельство  
о государственной регистрации  
КВ4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Недосека А.Я., Недосека С.А., Бойчук О.И., Яременко М.А.*  
О пусковых нагрузках оборудования, работающего при высоких  
температурах ..... 3
- Скальський В.Р., Лясота І.М.* Застосування методу акустичної  
емісії для визначення моменту початку макроруйнування зварних  
з'єднань алюмінієвого сплаву ..... 7
- Біда Г.В.* Петля гистерезиса, обусловленная задержкой  
необратимого смещения доменных границ ..... 13
- Дегтярев А.В., Потапов А. М.* Исследование свойств  
углепластиковых сотовых структур для легковесных конструкций  
ракетно-космического назначения ..... 20
- Маєвський С.М.* Роздільний вихрострумний контроль дефектів і  
товщини фарбового покриття ..... 27
- Лассе С.* Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферро-  
магнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена ..... 31
- Почапський Є.П.* Оцінка достовірності реєстрації  
світлових сигналів ..... 37
- Скачков И.О.* Мониторинг качества контактной точечной сварки  
переменным током с применением вейвлет-анализа ..... 43

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Гарф Э.Ф., Дядин В.П., Дмитриенко Р.И., Бернацкий А.В.,  
Литвиненко А.Е.* К вопросу повышения вязкости материала для  
баллонов высокого давления ..... 48

### СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

- Радиш Ю.В., Цечаль В.О. Кірєєв А.С., Шевченко І.Я.,  
Радько В.Г.* До питання гармонізації стандарту  
ДСТУ-Н Б А.З.1-15:2010. Настанова з ультразвукового контролю  
зварних з'єднань металевих конструкцій. Частина 2 ..... 54

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- Безлюдько Г.Я., Завальнюк О.П., Нестеренко В.Б., Марченко  
А.Ю., Соломаха Р.Н.* Обзорная оценка состояния и детальная  
экспертиза усталости металла больших размеров объектов и  
конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом ..... 57
- І. П. Білокуру – 75 ..... 66
- Троицкий В.А.* Основные тенденции развития  
неразрушающего контроля металлоконструкций ..... 67
- Технология, оборудование и материалы  
для капиллярного контроля изделий и соединений ..... 71

#### ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

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

**Publisher:** International Association «Welding»

**EDITORIAL BOARD**

**Editor-in-Chief**  
**B. E. PATON**

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),  
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),  
Z. A. Maidan (exec. secr.),  
N. P. Aleshin, V. L. Vengrinovich,  
E. F. Garf, A. A. Gruzd,  
E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko,  
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,  
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,  
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,  
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,  
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,  
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,  
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,  
E. V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

**Address**

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

**Scientific editors**

N. G. Bely, A. A. Gruzd

**Editors**

T. V. Ushntina

**Electron galley**

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001.  
All rights reserved

This publication and each of the articles  
contained here in are protected by copyright.

Permission to reproduce material contained  
in this journal must be obtained  
in writing from the Publisher

«*Tekhnicheskaya diagnostika  
i nerazrushayushchiy kontrol*»

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

**CONTENT**

**SCIENTIFIC-TECHNICAL**

*Nedoseka A. Ya., Nedoseka S.A., Boichuk O.I., Yaremenko M.A.*  
On starting loads of equipment operating at high temperatures ..... 3

*Skalskii V.R., Lyasota I.M.* Application of acoustic emission method to  
determine the moment of the start of macrofracture in aluminium alloy  
welded joints ..... 7

*Bida G.V.* Loop of hysteresis specified by a delay of irreversible  
shifting of domain boundaries ..... 13

*Degtyarev A.V., Potapov A.M.* Investigation of properties of  
coal-plastic honeycomb structures for lightweight  
aerospace applications ..... 13

*Maevskii S.M.* Separate eddy-current testing of defects and thickness  
of paint coating ..... 20

*Lasse S.* Detection of grinding defects in parts from  
ferromagnetic materials using Barkhausen effect ..... 27

*Pochapskii E.P.* Evaluation of validity of light signal recording ..... 37

*Skachkov I.O.* Monitoring of quality of a.c. resistance spot welding  
using wavelet analysis ..... 43

**INDUSTRIAL**

*Garf E.F., Dyadin V.P., Dmitrienko R.I., Bernatskii A.V.,  
Litvinenko A.E.* On increasing the toughness of material for high pres-  
sure cylinders ..... 48

**STANDARTIZATION AND CERTIFICATION**

*Radish Yu.V., Tsetchal V.O., Kireev A.S., et al.* On harmonizing  
DSTU-N B A.3.1-15:2010. Standard guidelines on ultrasonic testing of  
welded joints of metal structures. Part 2 ..... 54

**NEWS AND INFORMATION**

*Bezlyudko G. Ya., Zavalnyuk O.P., Nesterenko V.B., Marchenko  
A. Yu., Solomakha R.N.* Survey-based estimate and detailed exami-  
nation of metal fatigue in large-sized objects and structures by non-  
destructive coercimetric method ..... 57

I.P. Bilokur is 75 ..... 66

*Troitskii V.A.* Main tendencies in development of NDT  
of metal structures ..... 67

Technology, equipment and materials for capillary control  
of products joints ..... 71

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic



УДК 621.12.30

## О ПУСКОВЫХ НАГРУЗКАХ ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, доктора техн. наук, О. И. БОЙЧУК, М. А. ЯРЕМЕНКО, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Рассмотрены характер и величины температурных полей и напряжений, возникающих при внезапном приложении высокой температуры и давления к внутренней стенке трубы. На примере трубы горячего промпрегрева из стали 15X1M1Ф показан большой градиент распределения температуры и напряжений в направлении радиуса. Для целостности труб в этих случаях рекомендовано медленное повышение давления при подаче пара на внутреннюю стенку трубы.*

*Nature and magnitudes of temperature fields and stresses arising at abrupt application of high temperature and pressure to pipe inner wall are considered. A high gradient of distribution of temperature and stresses along the radius is shown in the case of hot reheating pipe from 15Kh1M1F steel. It is suggested that the influence on pipe integrity will be favourable in these cases at slower application of pressure and steam to pipe inner wall.*

Режимы пуска и остановки оборудования, работающего при высоких температурах, имеет большое значение для прочности его узлов и отдельных элементов. Наличие гидравлических и пневматических ударов, вызываемых резким изменением режима работы, приводит к подвижности структуры материалов и, как следствие, развитию или перемещению дефектов. Дефекты могут объединяться и прогрессировать. Опасность связана с количеством и «жесткостью» изменения режимов эксплуатации. С течением времени количество дефектов растет и режимы эксплуатации, а также количество наработанных оборудованием часов имеют существенное значение.

Рассмотрим случай пуска в эксплуатацию трубопровода горячего промежуточного перегрева пара теплоцентрали большой длины с наружным

диаметром 630 мм, толщиной стенки 25 мм, марка материала трубы 15X1M1Ф (рис. 1). После непродолжительной остановки оборудования для обследования и выполнения ремонтных работ подают горячий пар. Быстрое открывание заслонки равносильно термоудару по холодной внутренней стенке трубы. В этом случае возникают значительные напряжения, которые и приводят к движению дефектов, а трубу с большим временем наработки могут привести к разрушению. Распределение температуры в стенке трубы можно подсчитать по известной формуле [1]:

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda_0} \int_0^{t_0} \exp \left[ -\frac{(r-r_1)^2}{4at} - bt \right] \sqrt{\frac{a}{\pi r r_1}} dt, \quad (1)$$

где  $q$  — количество тепла, приложенное к стенке трубы, кал/см·с;  $\lambda_0$  — теплопроводность материала трубы, кал/см·с·°С;  $a$  — коэффициент температуропроводности материала см<sup>2</sup>/с;  $r_1$  — внутренний радиус трубы, см;  $b$  — коэффициент, характеризующий время выравнивания температуры между носителем (источником) и внутренней стенкой трубы, 1/с (коэффициент определяется экспериментально и в нашем случае равен 0,0005 1/с;  $r, t$  — радиус, см, и текущее время с.

Интеграл, взятый от 0 до  $t_0$ , показывает, что источник тепла действует в течение некоторого времени  $t_0$ .

Количество тепла, приложенное к внутренней стенке трубы при температуре 542 °С, может быть подсчитано, исходя из свойств горячего пара при давлении 3,8 МПа. Этому давлению соответствуют следующие значения теплоемкости и плотности:  $C = 19,07$  кДж/кг·°С;  $r = 3,7$  кг/м<sup>3</sup> [2]. Тогда  $\theta = Cr(\theta - \theta_0) = 19,07 \times 3,7 \times 522 = 38050$  кДж/м<sup>3</sup>

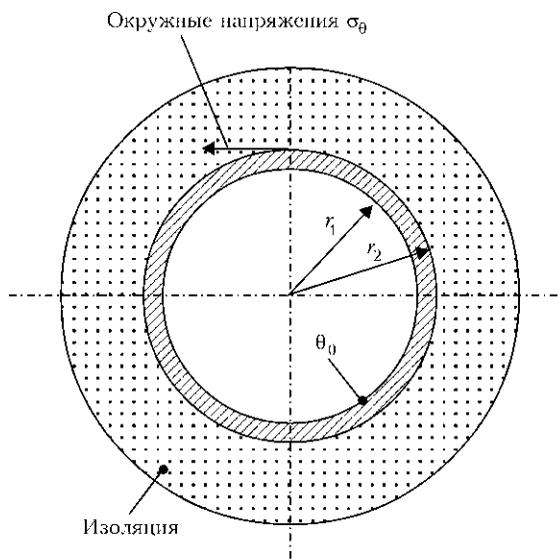


Рис. 1. Единичный элемент трубопровода с теплоизоляцией (ось  $z$  направлена перпендикулярно плоскости чертежа)

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук, М. А. Яременко, 2012



или  $\theta = 9,1 \text{ кал/см}^3$  с учетом того, что начальная температура в цеху  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Учитывая поперечное сечение трубы радиусом  $29 \text{ см}$  и полагая непрерывное действие источника в течение времени  $t_0$ , а также КПД передачи тепла стенке трубы паровой смесью, для  $q$  получим следующее значение:  $q = 3772 \text{ кал/см}\cdot\text{с}$ . Формула (1) справедлива для круглой пластины бесконечных размеров по радиусу  $r$ . Однако, если рассматривать моменты времени, когда температура на наружной стенке трубы будет равна нулю (поток тепла еще не дошел до этой стенки), то можно воспользоваться этой формулой и подсчитать распределение температуры в стенке трубы в начальные моменты времени. Кроме того, отметим, что нас интересуют именно моменты, где градиент температурного поля должен быть максимальным.

Значения температур, подсчитанных по формуле (1) для различных моментов времени, представлен на рис. 2. Из графика видно, что температура в стенке трубы растет «динамично», постепенно неравномерно нагревая трубу. В первые моменты времени после подачи горячего пара неравномерность значительна (1...10 с). При этом на наружной стенке трубы температура в рамках погрешности равна нулю. Естественно при таком распределении температуры в трубе возникнут существенные напряжения, которые могут быть подсчитаны по известным формулам [3]:

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_t E}{(1-\nu)r^2} \left( \frac{r^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta r dr + \int_{r_1}^r \theta r dr - \theta r^2 \right),$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_t E}{(1-\nu)r^2} \left( \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta r dr - \int_{r_1}^r \theta r dr \right), \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_t E}{(1-\nu)r^2} \left( -\theta + \frac{2}{r_1^2 - r_0^2} \int_{r_1}^{r_2} r \theta dr \right),$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu (\sigma_\theta + \sigma_z)],$$

где  $r_2$  — наружный радиус трубы;  $\alpha_t$  — коэффициент линейного расширения материала трубы,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;

$$\varepsilon_r = -\frac{\nu}{E} (\sigma_\theta + \sigma_z),$$

так как величина  $\sigma_r$  ничтожно мала.

Расчет напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  показал, что они сжимающие на внутренней стенке трубы. В этом случае деформация материала трубы в направлении радиуса будет положительной растягивающей и по расчетам достигает достаточно большой величины. Кроме того, она развивается в течение ограниченного промежутка времени и носит динамический характер. Движение металла приводит

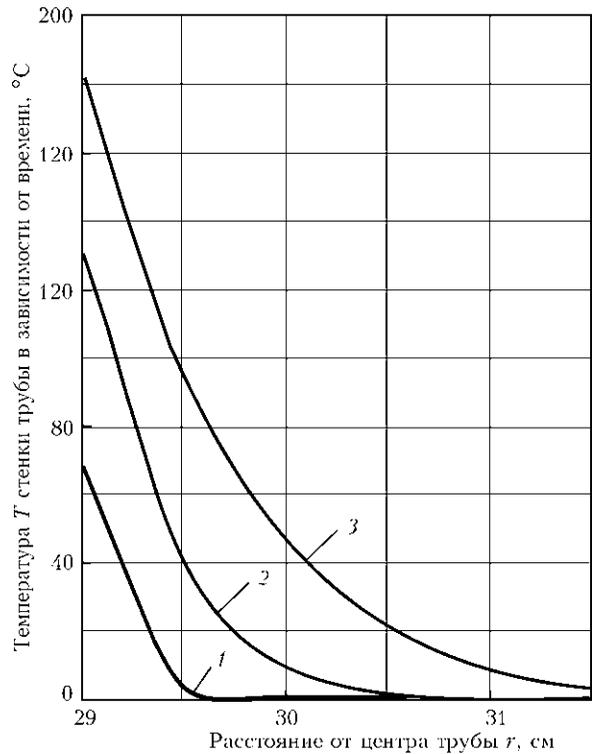


Рис. 2. Распределение температуры в стенке трубы 630×25мм из стали 15Х1М1Ф: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10 с

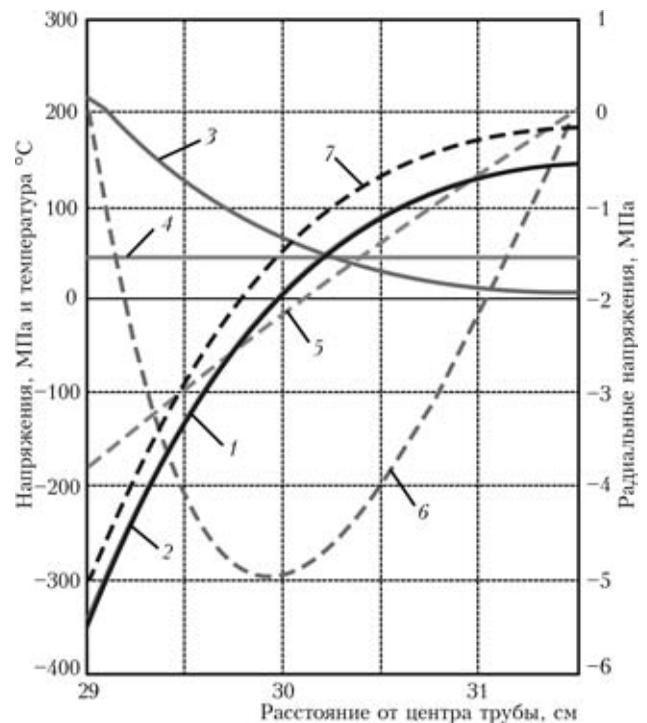


Рис. 3. Напряжения и температура в стенке трубы через 10 с после начала действия источника нагрева: 1, 2 — температурные напряжения  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$ , МПа; 3 — температура,  $^\circ\text{C}$ ; 4 — напряжения  $\sigma_\theta$  от внутреннего давления, МПа; 5 — суммарные напряжения  $\sigma_\theta$  от внутреннего давления и температуры; МПа; 6 — напряжения в радиальном направлении, МПа; 7 — радиальные напряжения от действия внутреннего давления, МПа



также к подвижности дефектов материала, которые в том или ином виде всегда присутствуют в нем. Динамический характер процесса может привести к негативным последствиям, особенно при многократных пусках и остановках объекта независимо от того, как часто это происходит. Графики распределения температурных напряжений представлены на рис. 3, из которых видно неравномерное их распределение в стенке трубы: на внутренней стенке они сжимающие и достигают значений до -350 МПа, на наружной — растягивающие 140 МПа. Цифра условна и соответствует принятой схеме расчета и значениям физических констант материала трубы. На рис. 4 показаны напряжения от действия внутреннего давления 3,8 МПа. Напряжения представлены двух типов — обычные в установившемся режиме эксплуатации и динамические, связанные с внезапным приложением давления внутри трубы в пусковой период.

Как известно, при внезапном приложении нагрузки величина напряжений увеличивается в два раза [4]. В данном случае на внутренней стенке трубы они составят 46 и 92 МПа соответственно. Если динамические напряжения от действия температуры просуммировать с одноименными статическими и динамическими от действия внутреннего давления, то их сумма несколько уменьшается за счет суммирования напряжений разных знаков. Суммарные напряжения сжимающие.

Подсчет напряжений  $\sigma_z$ , действующих в направлении оси трубы, показал, что на внутренней поверхности трубы действуют также сжимающие напряжения порядка 460 МПа. Как видно, сами по себе напряжения не опасны, хотя и близки к пределу текучести материала. Некоторую опасность представляет положительная деформация материала трубы в направлении радиуса.

Величина деформации  $\epsilon_r$  на внутренней стенке трубы находится в пределах упругости материала 15X1M1Ф [5] и составляет 0,104 %. Такая деформация, как уже было сказано, приводит к перемещению и слиянию дефектов структуры материала, особенно в случае ее динамического характера. Этот фактор необходимо учитывать при проведении пусковых работ. Если учесть интенсивность нагрева трубы действующим источником и характер развития температурных напряжений, то пуск оборудования такого типа должен проводиться в течение не менее 15...20 мин (рис. 3–5).

Существенное влияние на величину напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_\theta$  оказывает состояние изоляции трубы. Так, если труба изолирована без дефектов в соответствие с нормативной документацией ( $\alpha = 0,00005 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$  [1, 6]), то напряженное состояние практически равно нулю и температура равномерно распределена по толщине стенки. Если имеется нарушение изоляции, напри-

мер, незаполненные «рваные» участки ( $\alpha = 0,005 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$ ), то напряженное состояние от неравномерного распределения температуры в этом случае может достигнуть 100 МПа и более. Еще более неблагоприятное состояние может быть, если кроме нарушения изоляции порван или отсутствует защитный металлический кожух. За счет более интенсивного контакта трубы с окружающей средой и более интенсивного теплоотвода напряжения могут достигнуть очень большой величины. При этом, если напряжения на внутренней стенке трубы сжимающие и улучшают общую картину, то на наружной стенке они растягивающие и складываются с действующими от внутреннего давления.

Неравномерное распределение температуры в стенке трубы в начальные промежутки времени и

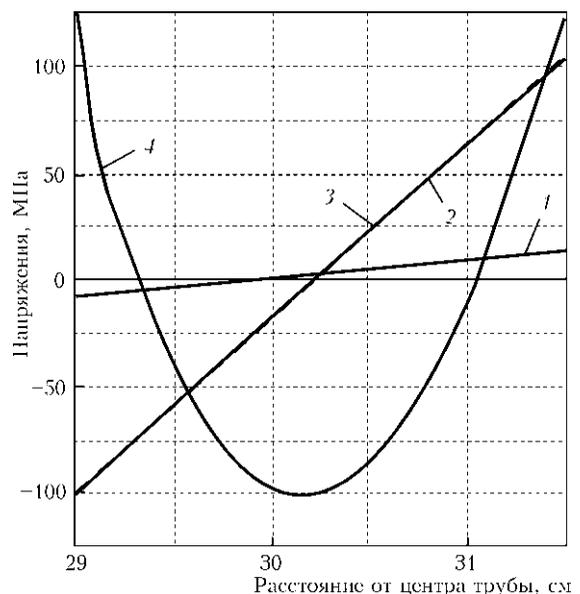


Рис. 4. Напряжения в стенке трубы через 900 с после начала действия источника нагрева: 1 — напряжения  $\sigma_\theta$  при  $\alpha = 0,0005 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$ ; 2, 3 — напряжения  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  при  $\alpha = 0,005 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$ ; 4 — напряжения  $\sigma_r$  при  $\alpha = 0,005 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$

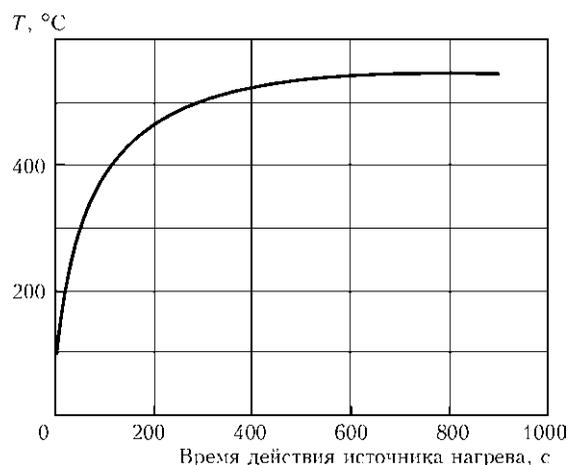


Рис. 5. Рост температуры на внутренней стенке трубы в зависимости от времени действия источника нагрева

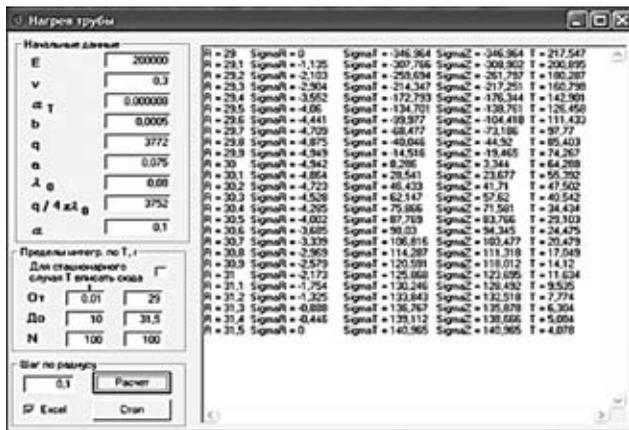


Рис. 6. Окно программы расчета температуры и напряжений по формулам (1), (2)

подвижность дефектов, вызванная температурными напряжениями, дает возможность оценить степень их опасности АЭ методом. Проанализировав полученную аппаратурой информацию, можно судить о степени опасности обнаруженных дефектов, а значит их допустимости или недопустимости.

Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту формул (2) наличие в них интегралов может привести к серьезным трудностям при расчетах, особенно, если температурное поле представлено достаточно сложным выражением (1). В этом случае расчет следует проводить по специальным программам, позволяющим сделать это быстро и без ошибок.

На рис. 6 представлено окно такой программы для подсчета температуры и напряжений в зависимости от радиуса и времени. Программа достаточно удобна и позволяет без особых трудностей получить результат. Исходные данные расчета подставляются в соответствующие поля окна программы (на рис. 6 с левой стороны), а результат счета выводится непосредственно в Excel, что дает возможность быстро проанализировать и оформлять графики в требуемом стиле и вставлять их прямо в текст отчета или статьи. Программа начинает работать при нажатии кнопки «Расчет».

## Выводы

Температурное поле в стенке трубы при внешнем температурном ударе носит динамический характер с большим градиентом распределения температуры вдоль радиуса трубы.

Высокоградиентное распределение температуры вызывает такое же распределение напряжений.

Суммарные напряжения в стенке трубы носят динамический характер в течение незначительного периода времени (в данном случае до 10 с).

В последующие периоды происходит выравнивание температуры и динамическая составляющая напряжений исчезает. Остаются незначительные сжимающие напряжения, не играющие существенного значения в ее работе.

Основной составляющей напряженного состояния становятся напряжения от действия внутреннего давления и составляют для рассматриваемого случая величину порядка 50 МПа.

Наиболее опасным периодом пуска оборудования подачей горячего пара является начальный период, когда появляются и развиваются существенные деформации материала в направлении радиуса трубы. Эти деформации достигают значения, превышающего в два раза предел текучести данного материала. И хотя этот период достаточно мал, но этого может быть достаточно, чтобы вывести из строя трубу или послужить источником новых дефектов. Гарантированный пусковой период труб в эксплуатацию должен быть не менее 15...20 мин.

Возникающее при пуске оборудования температурное поле и напряжения могут быть использованы при оценке состояния материала трубы с помощью метода акустической эмиссии.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
2. Свойства насыщенного водяного пара от 0 до 100 бар. www.dpva.info.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — Киев: Наука, 1975. — 576 с.
4. Писаренко Г. С., Уманский Э. С. и др. Соппротивление материалов. — Киев: Выща шк., 1986. — 776 с.
5. Сталь и сплавы. www.splav.kharkov.com.
6. Мак-Адамс В. Теплопередача. — М.: Metallurgizdat, 1961. — 278 с.

Поступила в редакцию  
02.06.2012



## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ПОЧАТКУ МАКРОРУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

**В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ**, д-р техн. наук, **І. М. ЛЯСОТА**, інж. (Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України)

*Розглянуто особливості мікроструктури металу зони шва та термічного впливу стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 1201-T. Показано, що структурна неоднорідність цієї зони впливає на генерування акустичної емісії під час росту макротріщини. Встановлено, що найнебезпечнішою з точки зору міцності зварного з'єднання є межа сплавлення основного металу і шва, оскільки тут міститься значне скупчення інтерметалічних фаз та неметалевих включень.*

*Microstructural features of metal of weld zone and HAZ of butt welded joints of aluminium alloy 1201-T are considered. It is shown that the structural inhomogeneity of this zone influences acoustic emission generation during macrocrack growth. It is established that the most dangerous in terms of welded joint strength is the fusion line of base metal and weld, as it has a high concentration of intermetallic phases and nonmetallic inclusions.*

В умовах сучасного розвитку промисловості України все більше зростають об'єми випуску алюмінію і його високоміцних сплавів. Завдяки комплексу фізико-механічних, корозійних і технологічних властивостей вони успішно використовуються практично в усіх галузях науки і техніки. Для з'єднання більшості конструкцій застосовують процес зварювання, оскільки він є одним з найефективніших способів отримання нероз'ємних з'єднань. Велика хімічна активність компонентів, які входять до складу алюмінієвих сплавів (АС), взаємодія з киснем і схильність до поглинання водню призводять до виникнення у швах грубих оксидних плівок і пористості. Найміцніші сплави схильні до утворення гарячих тріщин. У зв'язку з цим актуальною на даний час є проблема діагностування зародження руйнування таких зварних з'єднань (ЗЗ), зокрема застосування у цьому напрямку методів акустичної емісії (АЕ).

**Стан проблеми.** Для з'єднання відповідальних елементів конструкцій з АС, зокрема у авіакосмічній промисловості, широко застосовують електронно-променево зварювання (ЕПЗ), оскільки цей метод забезпечує високу якість металу шва під час зварювання великих товщин за один прохід. Ці процеси досліджували у працях [1–3]. Особливістю термічного циклу за ЕПЗ є швидке нагрівання металу та його подальше охолодження. Короткочасність цього процесу зумовлює таку кінетику структурних перетворень, що призводить до знеміцнення та неоднорідності ЗЗ [4–13]. Найяскравіше згадана особливість проявляється за зварювання товстих плит і зумовлена розпадом твердого розчину міді в алюмінії та час-

тковою коагуляцією зміцнюючих фаз внаслідок нерівномірного нагрівання шва і прилеглих до нього ділянок основного металу [4–6].

Під час експлуатації елементів конструкцій, що виготовлені з алюмінієвих сплавів зі ЗЗ, під впливом різних чинників часто відбувається зародження у них мікро- та розвиток макроруйнування. Досить ефективно поширення тріщин виявляє метод АЕ [14]. Однак для оцінки руйнування ЗЗ алюмінієвих сплавів його застосовували мало [15]. Тому, для ефективного АЕ-діагностування стану елементів конструкцій, виготовлених з алюмінієвих сплавів, важливо дослідити АЕ-активність і особливості сигналів під час зародження і розвитку процесів руйнування різних зон ЗЗ.

У літературі відомі деякі результати таких досліджень. Зокрема, автори праці [16] застосовували метод АЕ для дослідження розвитку штучно створених дефектів-імітаторів у вигляді тріщин під час навантажування внутрішнім тиском зварних резервуарів, виконаних з АС АМг6М. За допомогою зареєстрованих під час експерименту сигналів АЕ (САЕ) автори розраховували критичний розмір тріщини, за якого ємність ще можна експлуатувати.

Вплив мікроструктури на випромінювання САЕ під час розтягання гладких зразків з технічного алюмінію та АС АМг6 вивчали автори праці [17]. Вони стверджують, що в сплаві АМг6 активність випромінювання АЕ більше ніж на порядок перевищує активність АЕ в алюмінії. Це зумовлено поведінкою границь зерен та наявністю часточок вторинної фази у сплаві.

У праці [18] виконано дослідження, метою яких було спостереження поведінки АЕ під час

руйнування ЗЗ з сплаву АМгбМ, а також встановлення залежності характеру САЕ від виду дефекту. Показано, що вже за невеликих напружень у межах пружної деформації (80...90 МПа) спостерігається значна активність (6...8 імп/с) АЕ, яка характеризується сигналами великої амплітуди. Встановлено, що навантаження зразка до напружень, у результаті яких з'являється пластична деформація (300...320 МПа), не викликає помітної АЕ. Подальше зростання деформації характеризується появою одиничних АЕ-імпульсів малої енергії і активності. У зоні глибокої пластичної деформації АЕ носить імпульсний характер, тобто з'являється у вигляді «емісії вибухового типу». Підвищення навантаження аж до руйнування супроводжується появою САЕ малої амплітуди.

Авторами праць [19, 20] було встановлено характер випромінювання САЕ під час розтягання гладких зразків, виготовлених з різних ділянок ЗЗ. Деформація зразків на 13 % дала сумарний рахунок САЕ  $N_{\Sigma}$  близько 500...800 імп., а у зоні сплавлення за тих же умов цей показник був  $N_{\Sigma} = 85 \cdot 10^3$  імп. Така специфіка випромінювання АЕ зумовлена наявністю в перехідній зоні значної кількості дефектів структури та скупченням різноманітних неметалічних включень уздовж границь зерен.

Метою роботи було вивчення особливостей генерування САЕ за статичного навантаження ЗЗ з термічнообробленого сплаву 1201-Т, виконаних ЕПЗ, та визначення за параметрами АЕ моменту старту тріщини, виведеної у різних ділянках ЗЗ.

**Матеріали та методика АЕ-випробувань.** Досліджували статичну тріщиностійкість за механізмом триточкового згину ЗЗ плит товщиною  $\delta = 20$  мм, які виконані наскрізним ЕПЗ без присадного металу. Режим зварювання: швидкість 70 м/год, напруга прискорення 60 кВ, струм променя 120 мА, погонна енергія 337,3 кДж/м. Матеріал зварних плит — термічнозмцнений алюмінієвий сплав марки 1201-Т.

Випробовували призматичні зразки розміром 10×20×160 мм трьох типів: I — з виведеною утомною тріщиною у основному металі; II — у зоні термічного впливу (ЗТВ); III — у зоні сплавлення. Зразки виготовляли з дотриманням норм і характерних співвідношень геометричних розмірів, що регламентуються у роботі [21]. Довжина тріщини від утоми разом із концентратором становила 10 мм. Структурну схему експериментальних досліджень представлено на рис. 1.

Навантажування зразків виконували на установці СВР-5 — 1, зусилля  $P$  з якої через динамометр 2 передавалось на досліджуваний зразок 3. Розкриття берегів тріщини реєстрували тензометричним перетворювачем розкриття берегів тріщини 4. Сигнали АЕ, згенеровані у результаті

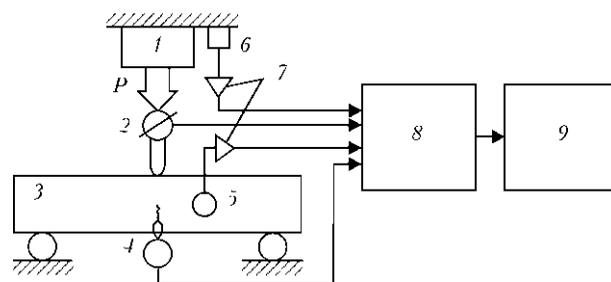


Рис. 1. Структурна схема експериментальних досліджень (позначки див. у тексті)

руйнування, сприймалися первинним перетворювачем АЕ (ПАЕ) 5, який встановлювали на боковій поверхні зразка. Для селекції корисних сигналів від завад використовували паралельний АЕ-канал [14] (ПАЕ 6). Електричні сигнали АЕ підсилювали попередніми підсилювачами 7, після чого реєстрували багатоканальною вимірювальною АЕ системою SKOP-8М — 8 і обробляли на персональному комп'ютері 9. Для зменшення впливу хибних САЕ від тертя у місці дотикання поверхонь балкового зразка з опорами установки на них встановлювали антифрикційні прокладки. Навантаження та розкриття берегів тріщини реєстрували параметричними каналами згаданої вище системи. У режимі постобробки будували діаграми «навантаження  $P$  — розкриття берегів тріщини  $v$ » та «навантаження  $P$  — час руйнування  $t$ » для різних ділянок ЗЗ.

Для відбору САЕ використовували первинні перетворювачі з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. Перед початком кожного експерименту проводили тарування вимірювальних каналів [14]. Встановлювали такі налаштування АЕ-системи SKOP-8М: кількість вимірювальних каналів — 4, з яких два — для реєстрування САЕ (підсилення кожного 40 дБ); тривалість вибірки 0,5 мс; період дискретизації аналогового сигналу 0,25 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот 700 кГц; фільтра високих частот 40 кГц; поріг дискримінації 28 %; рівень власних шумів, приведені до входу попереднього підсилювача — 7 мкВ. Коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів становив 34 дБ.

**Дослідження мікроструктури зварних з'єднань.** Відомо [17, 19, 20], що структурний чинник має суттєвий вплив на генерування САЕ під час руйнування ЗЗ. Тому нами перед АЕ-випробуваннями досліджено структурну та механічну неоднорідність ЗТВ. Металографічні дослідження виконували скануючим електронним мікроскопом EVO-40XVP. Напруга прискорення пучка електронів 20 кеВ. Мікротвердість металу ЗЗ вимірювали мікротвердоміром ПМТ-3. Навантаження на індентор становило 0,54 Н.

Як відомо [8], динаміка структурних перетворень у кожній точці ЗТВ залежить від максимальної температури їх нагрівання і часу перебування



у відповідному інтервалі температур. Тому для кращого аналізу металургійних процесів, що протікають під час ЕПЗ товстих плит з АС, з використанням методики [22] розраховали температурне поле і побудували розподіл максимальних температур точок ЗТВ з віддаленням від центру зварного шва.

На рис. 2 показано структуру металу ЗЗ та графіки розподілу максимальних температур і мікротвердості. Бачимо, що зміни в ЗТВ протікають уже за температури 723 К. Спостерігається чітке витравлення структурних складових, викликане частковою коагуляцією зміцнюючих фаз, які виділились у об'ємі зерен і вздовж їхніх границь. Відомо [4], що розпад перенасиченого твердого розчину сплавів Al-Cu відбувається у такій послідов-

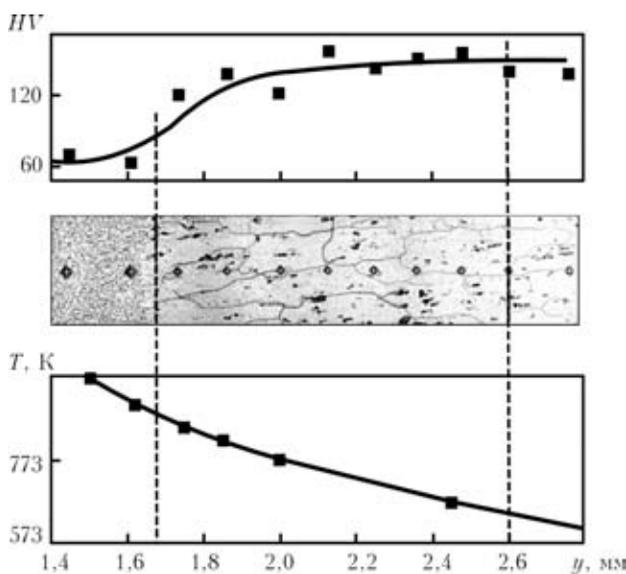


Рис. 2. Зміна мікротвердості і мікроструктури ЗТВ та розподіл максимальних температур точок з віддаленням від осі шва

ності: утворення вздовж кристалографічних площин {100} зон Гінье-Престона; у твердому розчині зародження проміжної  $\theta''$ -фази, склад якої відповідає фазі  $Al_2Cu$ ; виділення часток  $\theta'$ -фази; формування стабільної  $\theta$ -фази ( $Al_2Cu$ ). Завершальним етапом розпаду є процеси коагуляції зміцнювача, які протікають за температур вище 673 К. Також зазначимо, що метал зварного шва відрізняється від ЗТВ дрібнозернистістю структури.

Характерними рисами теплового впливу за ЕПЗ сплаву 1201-Т є швидке нагрівання металу до максимальних температур і дещо повільніше його охолодження. Під час зварювання штучно зістареного сплаву в період швидкого нагрівання не встигають пройти коагуляційні процеси. Під час наступного охолодження, починаючи з температури 823 К і нижче, відбувається високотемпературний розпад твердого розчину, що супроводжується утворенням зміцнювача. Зародки  $\theta$ -фази формуються, у першу чергу, уздовж границь зерен [5], оскільки ці ділянки містять різного роду домішки, а також у тілі зерна. Їхній розвиток відбувається за рахунок притоку атомів міді з оточуючого розчину. Таким чином, з віддаленням від основного металу до межі сплавлення границі зерен потовщуються і з'являються світлі приграничні області збідненого міддю розчину алюмінію. На рис. 3 і 4 приведено мікроструктури та енергодисперсійні спектри точок ЗТВ алюмінієвого сплаву марки 1201-Т. Бачимо (рис. 3), що метал тіла оплавленого та рекристалізованого зерна, який знаходиться неподалік межі сплавлення, складається з твердого розчину міді в алюмінії і є збіднений на фазу  $Al_2Cu$ , оскільки вона у процесі високотемпературного розпаду твердого розчину коагулювала на його границі (рис. 4). Ці яви-

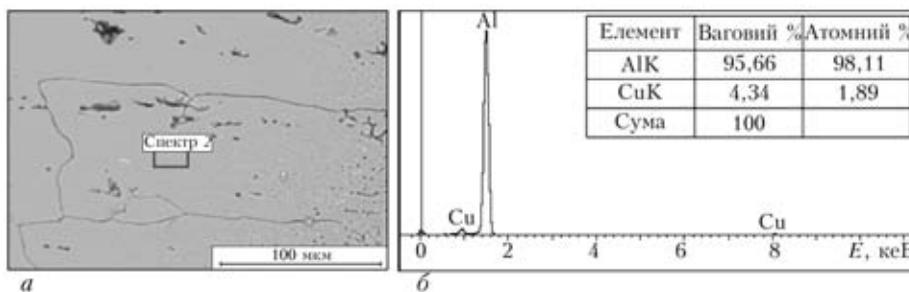


Рис. 3. Мікроструктура (а) та EDS-спектр розподілу елементів (б) в тілі зерна металу ЗТВ з'єднання сплаву 1201-Т, виконаного ЕПЗ

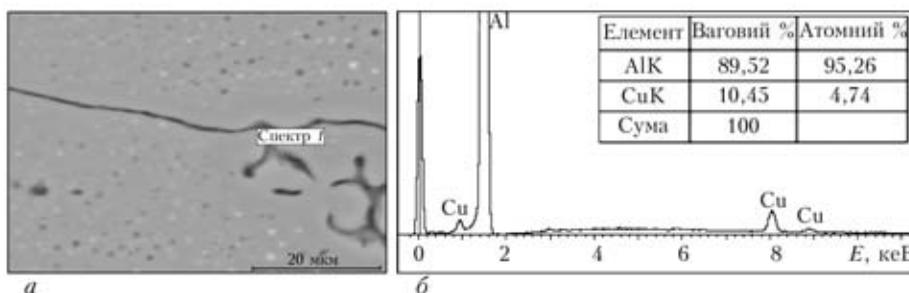


Рис. 4. Мікроструктура (а) та EDS-спектр розподілу елементів (б) на границі зерна у ЗТВ з'єднання сплаву 1201-Т



Значения параметров  $K_{IS}$  і  $K_{IC}$  різних ділянок ЗЗ пластини сплаву 1201-Т

Ділянка ЗЗ	$K_{IS}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
Основний метал	23,3	31,1
ЗТВ	17	20,2
Зона сплавлення	18,7	24,4

ща пояснюють зниження твердості та зростання пластичності металу ЗТВ.

Таким чином, перебіг розчинення і повторного утворення твердого розчину, його розпаду та коагуляції окремих часточок формує механічні характеристики пришовної зони. Оплавлення зерен на межі сплавлення, утворення неперервних крихких евтектичних прошарків уздовж їхніх границь

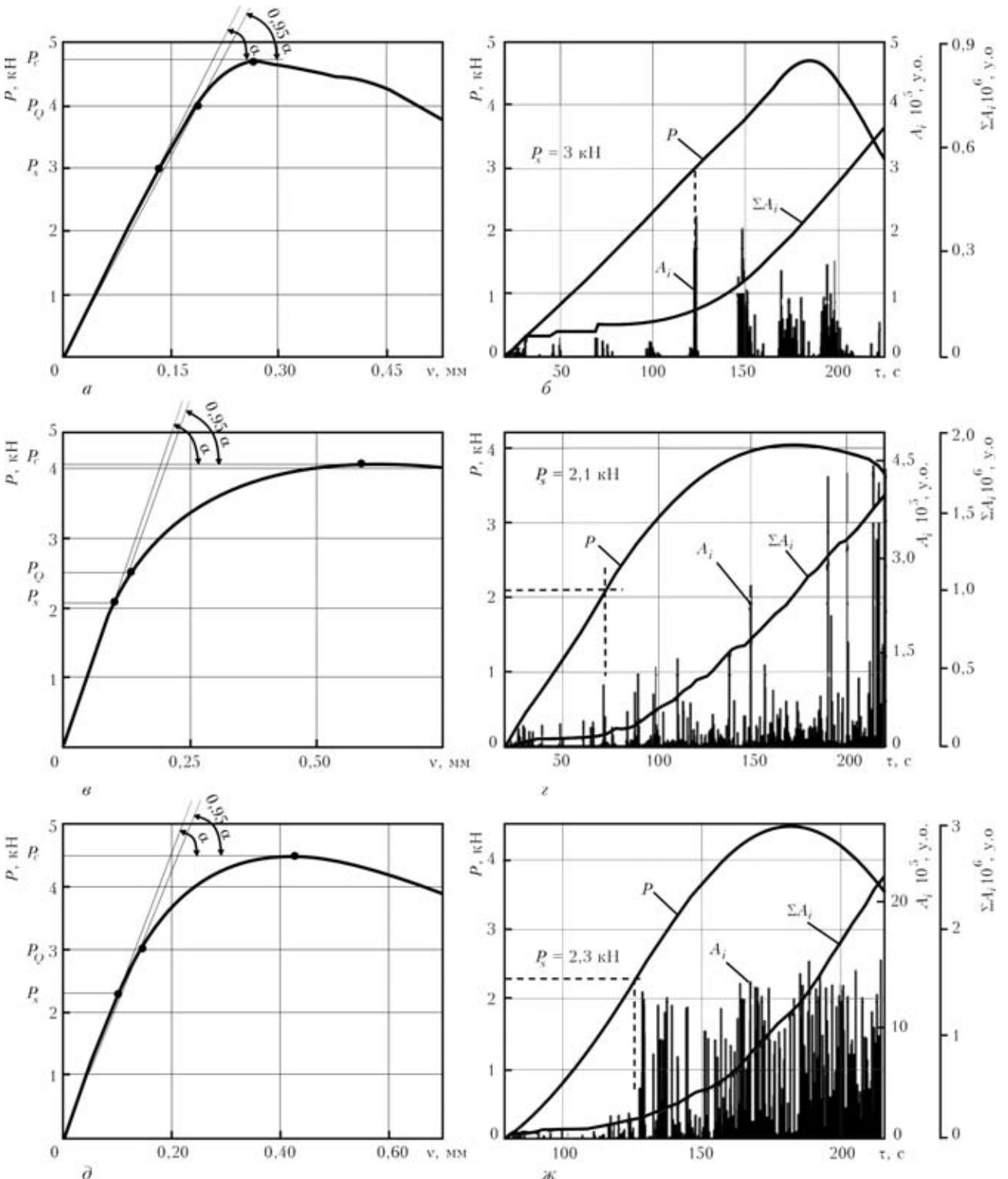


Рис. 5. Діаграми руйнування «P-v» основного металу, ЗТВ та зони сплавлення (а, в, д), а також зміна у часі навантаження, суми амплітуд у вибірці  $A_i$  і суми амплітуд всіх зареєстрованих САЕ за час експерименту (б, г, ж) у цих ділянках відповідно



сприяють окрихченню сплаву, а рекристалізація і ріст зерна знижують міцність та тріщиностійкість ЗЗ [23, 24]. Ось чому важливо оцінити вплив цих явищ під час АЕ-дослідження процесів зародження і розвитку руйнування таких з'єднань.

**Результати АЕ-досліджень та їх обговорення.** Досліджували вплив мікроструктури і міцності характерних ділянок ЗЗ на в'язкість руйнування металу та генерування АЕ. Відомо [20], що метод АЕ чутливо реагує на процеси тріщиноутворення і дозволяє точніше, ніж традиційні методи [21] визначити початок субкритичного росту тріщини. Показано [20], що за початок росту макротріщини слід брати момент якісної зміни інтенсивності САЕ на акустограмі, яка записана паралельно із діаграмою зміни навантаження у часі. За визначеним таким чином значенням навантаження  $P_S$ , яке пропонуємо приймати за старт тріщини, обчислюють параметр  $K_{IS}$ . Зазвичай  $K_{IS}$  має нижче значення від  $K_{IC}$ , визначеного за регламентованими нормативно-технічною документацією методиками.

На рис. 5 показано діаграми «навантаження  $P$  — розкриття берегів тріщини  $v$ » та «навантаження  $P$  — час руйнування  $\tau$ », а також зміну у часі суми амплітуд сигналів  $A_i$ , що перевищили поріг дискримінації. З графіків зміни навантаження і амплітуд САЕ бачимо, що для усіх груп зразків характерним є різке підвищення АЕ-активності на ділянках 2...3 кН, що згідно [20] свідчить про старт макротріщини. Експерименти показали, що для усіх розглянутих випадків значення навантаження  $P_S$  менше, ніж  $P_Q$  на 0,4...1,0 кН, а це підтверджує краще визначення моменту старту тріщини АЕ-методом. У таблиці приведено значення параметрів  $K_{IS}$  і  $K_{IC}$  для кожної зони ЗЗ.

Під час руйнування основного металу сплаву 1201-Т, який є гартованим та штучно зістареним, діаграма « $P - v$ » (рис. 5, а) відповідає крихков'язкому типу руйнування. У даному випадку значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{IS}$  є найвищими. Спостерігається мала кількість САЕ великих амплітуд, що свідчить про стрибкоподібний ріст макротріщини (рис. 5, б). На закритичній її стадії інтенсивність АЕ послаблюється.

У випадку руйнування металу ЗТВ діаграма « $P-v$ » є пологішою (рис. 5, в), що відповідає в'язкому руйнуванню. Ця ділянка є знеміщеною порівняно з основним металом (див. рис. 2), зерна тут рекристалізовані та збіднені на вторинні фази (див. рис. 3). На докритичній стадії росту тріщини спостерігається велика кількість сигналів з низькими амплітудами, що характерно для пластичного руйнування. Значення коефіцієнта  $K_{IS}$  тут є найменшим. Після досягнення максимального навантаження тріщина стрибкоподібно переходить у зону сплавлення, де на закритичній стадії її розвитку руйнування відбувалося за крихкішим ме-

ханізмом і супроводжується сигналами АЕ великих амплітуд (рис. 5, з).

Під час випробувань статичної тріщиностійкості межі сплавлення в усіх зразках спостерігали квазікрихкий характер руйнування. Це пояснюється тим, що дана ділянка ЗЗ, як правило, містить значне скупчення інтерметалідних фаз та різного роду включень (див. рис. 2). Різка зміна розмірів структурних складових і скупчення крихких евтектик на границях оплавлених рекристалізованих зерен ЗТВ є причиною зниження її локальної пластичності. Крихке руйнування зміцнюючих фаз спостерігається генеруванням значної кількості САЕ великих амплітуд. З діаграми розподілу суми амплітуд  $A_i$  (рис. 5, ж) чітко видно момент старту тріщини, який супроводжується різким зростанням АЕ-активності.

## Висновки

Дослідження мікроструктури та твердості зварних з'єднань термічно-зміцненого алюмінієвого сплаву марки 1201-Т, виконаних електронно-променевим зварюванням, показали, що даний матеріал схильний до значного розпаду твердого розчину. Розміщення металу шва та ЗТВ відбувається за рахунок збіднення рекристалізованих зерен на атоми міді, яка у вигляді фази  $Al_2Cu$  у процесі високотемпературного розпаду твердого розчину коагулювала на їх границях. Інтенсивний відвід тепла у бік основного металу спричиняє сильний ріст зерен ЗТВ, розміри яких подекуди сягають 0,55 мм. Метал шва навпаки — дрібнозернистий і знеміщений до рівня, характерного для металу у відпаленому стані. Його твердість становить приблизно HV 70. Як наслідок, ця структурна та механічна неоднорідність зварних з'єднань сплаву 1201-Т має вплив на зародження та розвиток у них макроруйнування.

За допомогою методу АЕ можна точніше визначити момент старту макротріщини у АС та їх зварних з'єднаннях за квазістатичного навантаження, а значить і кількісно об'єктивніше оцінювати в'язкість руйнування металоконструкцій. Це дозволить у режимі реального часу діагностувати процеси розвитку тріщин різних ділянок зварних з'єднань. Руйнування металу ЗТВ супроводжується невеликою кількістю САЕ слабких амплітуд, натомість розтріскування крихких евтектик межі сплавлення генерує велику кількість потужних сигналів. За результатами експериментальних випробувань встановлено, що ця ділянка є найнебезпечнішою з точки зору міцності конструкцій. Практично в усіх зразках тріщина на закритичній стадії свого розвитку змінює напрям поширення у зону сплавлення, оскільки енергія, яка потрібна на руйнування металу, тут є найменшою.



Цель работы — изучить особенности генерирования сигналов акустической эмиссии при статической нагрузке сварных соединений термически упрочненного сплава 1201-Т, выполненных ЭЛС.

Трехточечным изгибом исследовали статическую трещиностойкость образцов сварных соединений плит толщиной  $\delta = 20$  мм, выполненных сквозной ЭЛС без присадочного металла. Погонная энергия сварки 337,3 кДж/м. Анализ фазовых превращений, протекающих при сварке данного сплава, показал, что уже при температуре 723 К происходят изменения в зоне термического влияния, связанные с коагуляцией укрепляющих фаз на границе рекристаллизованных зерен. Это и есть причиной снижения прочности металла с приближением к центру шва. Как следствие, такая структурная и механическая неоднородность сварных соединений влияют на зарождение и развитие в них макроразрушения.

Перспективными при диагностировании процессов разрушения сварных соединений алюминиевых сплавов являются методы, основанные на явлении акустической эмиссии. Показано, что с их помощью можно точнее определять момент старта макротрещины, а тем самым более эффективно оценивать вязкость разрушения металлоконструкций. Разрушение металла ЗТВ сопровождается небольшим количеством акустических сигналов слабых амплитуд, а растрескивание хрупких эвтектик границы сплавления генерирует большое количество мощных сигналов. По результатам экспериментальных испытаний установлено, что этот участок наиболее опасен с точки зрения прочности конструкций. Практически во всех образцах трещина на закритической стадии своего развития меняла направление распространения в зону сплавления, поскольку здесь энергия, необходимая на разрушение металла, имеет наименьшее значение.

1. Ищенко А. Я. Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 16–26.
2. Ищенко А. Я. Сварка алюминиевых сплавов (направления исследований, проводимых в ИЭС им. Е. О. Патона) // Там же. — 2007. — № 11. — С. 10–31.
3. Патон Б. Е., Бондарев А. А. Современное состояние и новые технологии электронно-лучевой сварки конструкций // Там же. — 2004. — № 9. — С. 23–31.
4. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 204 с.
5. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
6. Рабкин Д. М., Лозовская А. В., Склабинская И. Е. Металловедение сварки алюминия и его сплавов. — Киев: Наук. думка, 1992. — 160 с.

7. Ищенко А. Я., Лозовская А. В. Кинетика превращений при сварке термически упрочненного алюминиевого сплава 1201 // Автомат. сварка. — 1980. — № 1. — С. 29–32.
8. Разупрочнение высокопрочных алюминиевых сплавов при различных способах сварки плавлением / А. В. Лозовская, А. А. Чайка, А. А. Бондарев и др. // Там же. — 2001. — № 3. — С. 15–19.
9. Особенности электронно-лучевой сварки сплава 1201 / А. А. Бондарев, А. В. Лозовская, А. Я. Ищенко и др. // Там же. — 1974. — № 2. — С. 20–22.
10. Malarvizhi S., Balasubramanian V. Effects of welding processes and post-weld aging treatment on fatigue behavior of AA2219 aluminium alloy joints // J. of Materials Engineering and Performance. — 2010. — 20, № 3. — P. 359–367.
11. Tosto S., Nenci F., Hu J. Microstructure and properties of electron beam welded and post-welded 2219 aluminum alloy // Materials Sci. and Technology. — 1996. — Vol. 12. — P. 323–328.
12. Alanati P., Двиеди Д. К. Структура и твердость металла сварных соединений алюминий-медного сплава // Автомат. сварка. — 2009. — № 4. — С. 26–32.
13. Ищенко А. Я., Лозовская А. В., Склабинская И. Е. Физическое моделирование тепловых процессов в металле ЗТВ при сварке алюминий-литиевых сплавов // Там же. — 2001. — № 9. — С. 5–8.
14. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. пос. у 3 т. — Київ: Наук. думка, 2009. — 878 с.
15. Скальський В. Р., Лясота І. Застосування явища акустичної емісії для діагностування руйнування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів (Огляд) // Машинознавство. — 2009. — № 9. — С. 42–47.
16. Мезинцев Е. Д., Тихий В. Г., Карасев Л. П. Применение имитаторов дефектов при испытании акустико-эмиссионной системы технической диагностики // Автомат. сварка. — 1982. — № 9. — С. 28–30.
17. Тихонов Л. В., Прокопенко Г. И. Детонационные механизмы деформации, разрушения и акустической эмиссии в алюминии и его сплавах // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 1. — С. 73–76.
18. Тихий В. Г., Санин Ф. П., Борщевская Д. Г. Исследование зависимости сигналов акустической эмиссии от характера дефектов сварки в сплаве АМг6 // Автомат. сварка. — 1982. — № 9. — С. 36–38.
19. Скальський В. Р., Сергієнко О. М., Голаскі Л. Генерування акустичної емісії тріщинами, що розвиваються у зварних з'єднаннях // Техн. диагностика і неразруш. контроль. — 1999. — № 4. — С. 23–31.
20. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. — Львів: СПОЛОМ, 2005. — 396 с.
21. ГОСТ 25506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 61 с.
22. Skalsky V. R., Lyasota I. M. Estimation of the heat-affected zone for the electron-beam welding of plates // Materials science. — 2010. — 46, № 1. — P. 115–123.
23. Бондарев А. А., Голиков В. Н., Анисимов Ю. И. Сопротивляемость хрупкому разрушению соединений алюминиевого сплава 1201, выполненных ЭЛС // Автомат. сварка. — 1987. — № 3. — С. 6–7.
24. Лабур Т. М., Ищенко А. Я., Таранова Т. Г. Сопротивление разрушению сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов 1151 и 1201 // Там же. — 1991. — № 6. — С. 39–41.

Надійшла до редакції  
03.04.2012

## ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ЗАДЕРЖКОЙ НЕОБРАТИМОГО СМЕЩЕНИЯ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ

Г. В. БИДА, д-р техн. наук (Ин-т физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, РФ)

*Проанализировано различие между коэрцитивной и релаксационной коэрцитивными силами ферромагнетика при условии, что магнитный гистерезис в нем обусловлен задержкой необратимого смещения 180°-ных доменных границ. Сделан вывод, что максимальным уровнем критических полей в ферромагнитном кристалле определяется именно релаксационная коэрцитивная сила, а не коэрцитивная сила, и теория магнитного гистерезиса, разработанная для коэрцитивной силы, относится к релаксационной коэрцитивной силе. Из анализа спинки петли гистерезиса, обусловленной необратимыми изменениями намагниченности при условии, что критические магнитные поля единичных участков кристалла соответствуют их релаксационным коэрцитивным силам и эти поля подчиняются нормальному закону распределения, подтверждена функциональная связь между шириной петли и углом ее наклона в точке релаксационной коэрцитивной силы.*

*The difference between coercive and relaxation coercive forces of a ferromagnetic was analyzed under the condition that magnetic hysteresis in it is due to irreversible shifting of 180° domain boundaries. A conclusion is made that the maximum level of critical fields in a ferromagnetic crystal determines exactly the relaxation coercive force, and not the coercive force, and the magnetic hysteresis theory developed for the coercive force, pertains to relaxation coercive force. Analysis of the back of hysteresis loop induced by irreversible changes of magnetization, provided that the critical magnetic fields of individual regions of the crystal correspond to their relaxation coercive forces and these fields follow the normal law of distribution, confirmed the functional connection between the loop width and angle of its inclination in the point of coercive force relaxation.*

Магнитный гистерезис есть необратимое изменение намагниченности как при намагничивании, так и при перемагничивании ферромагнитного материала. Вместе с тем необратимые процессы сопровождаются обратимыми.

На рис. 1 показаны кривая намагничивания и предельная петля магнитного гистерезиса  $M(H)$  закаленного образца из стали 75Г, а также кривые намагничивания и петли гистерезиса, обусловленные сугубо обратимыми  $M_{rev}(h)$  и необратимыми  $M_{irr}(H)$  процессами. Ниже для сокращения будем называть эти петли обратимой и необратимой. Последняя петля построена по методике, изложенной в [1], а обратимая — как разности  $M_{rev}(H_i) = M(H_i) - M_{irr}(H_i)$  в каждом поле  $H_i$ . Несмотря на название, полученная упомянутым образом обратимая петля («бабочка») имеет некоторое раскрытие (гистерезис).

В дальнейшем наши рассуждения относятся исключительно к магнитному гистерезису, обусловленному задержкой необратимого смещения 180°-х доменных границ (ДГ). При этом будем считать, что их необратимое смещение на участках кристалла между задерживающими факторами (скачки Баркгаузена) будем считать основным (необратимое смещение ДГ первого рода). Необратимое смещение ДГ в пределах размера самого задерживающего фактора, приводящее к слабому гистерезису на частных несимметричных циклах, назовем вторичным (второго рода) и будем полагать изменение намагниченности по кривым возврата условно обратимым, пренебрегая указанной

необратимостью. Это относится и к кривой возврата  $M_s \rightarrow M_r$ .

Петля магнитного гистерезиса  $M_{irr}(H)$  обусловлена исключительно необратимыми изменениями намагниченности и ее ширину характеризует релаксационная коэрцитивная сила  $H_r$ . Ширину основной петли гистерезиса  $M(H)$  характеризует коэрцитивная сила  $H_c$  и по сложившимся на сегодня представлениям именно ее связывают с максимальной величиной задержки дефектами кристалла необратимых процессов при перемагничивании ферромагнетика и именно для нее были разработаны варианты существующей теории магнитного гистерезиса [2–26].

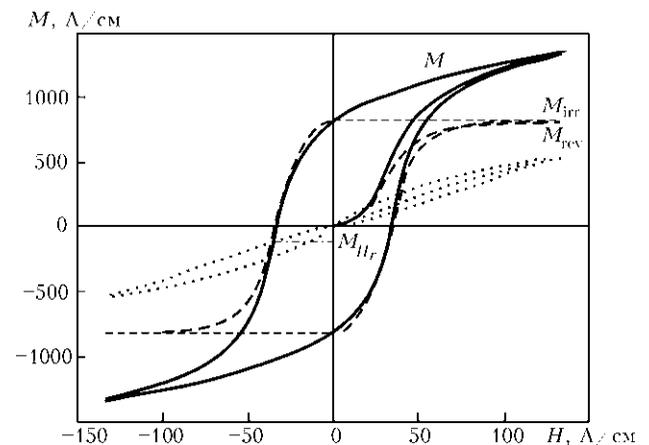


Рис. 1. Кривая намагничивания и предельная петля магнитного гистерезиса  $M(H)$  закаленного образца из стали 75Г, а также кривые намагничивания и петли гистерезиса этого же образца, обусловленные сугубо обратимыми  $M_{rev}(H)$  и необратимыми  $M_{irr}(H)$  процессами

В классических моделях гистерезиса («теория напряжений», «теория включений»), учитывающих взаимодействие единичного дефекта с единичной ДГ [2–15], понятие релаксационной коэрцитивной силы не используется, так как фактически отсутствует разница между  $H_c$  и  $H_r$ . Из современных представлений об этих моделях можно сделать вывод, что здесь  $H_c = H_r$ : так называемая теория коэрцитивной силы одновременно является и теорией релаксационной коэрцитивной силы.

В моделях [17–26] учитывается статистическое распределение дефектов и соответственно критических полей в кристалле. Здесь ДГ взаимодействует с большим числом дефектов, которое зависит от ее положения в кристалле. Считается, что критические поля обусловлены флуктуациями дефектов, которые оказываются в объеме ДГ при ее движении и которые мы выше назвали одним из задерживающих факторов, а коэрцитивную силу определяет среднее значение максимальных критических полей всех ДГ, которые вносят вклад в необратимые изменения намагниченности. Если  $H_{\max}^i$  есть критическое поле  $i$ -й ДГ, то для всего кристалла [26]

$$H_c = |H^i|_{\max} \quad (1)$$

Однако именно петля гистерезиса  $M_{\text{irr}}(H)$  определяется одними необратимыми изменениями намагниченности, причем  $H_r > H_c$ . Кроме того, при отключении магнитного поля, равного  $H_c$ , существует остаточная намагниченность  $M_{rc}$  положительного знака, а при отключении поля  $H_r$  остаточная намагниченность становится нулевой.

Поэтому мы полагаем, что именно релаксационная коэрцитивная сила  $H_r$  фактически обусловлена средним значением критических полей максимальной величины и выражение (1) должно относиться к  $H_r$ .

На рис. 2 приведены аналогичные петли для дифференциальных магнитных восприимчивостей этого же образца: предельной  $\chi_d$ , обратной  $\chi_{d,\text{rev}}$  и необратимой  $\chi_{d,\text{irr}}$ .

Рассмотрим процесс перемагничивания ферромагнетика вблизи  $H_c$  и  $H_r$  более подробно.

**Различие и связь между коэрцитивной и релаксационной коэрцитивными силами.** Коэрцитивная  $H_c$  и релаксационная коэрцитивная  $H_r$  силы соответствуют критическим полям в ферромагнитном кристалле разной величины. Рассмотрим разницу между ними. Как уже упоминалось, будем рассматривать лишь процессы смещения ДГ, имея в виду, что в магнитномногоосных кристаллах изменение намагниченности в окрестности точки происходит главным образом посредством движения  $180^\circ$ -ных границ [26].

Для анализа воспользуемся заимствованным из [26] схематическим изображением зависимости

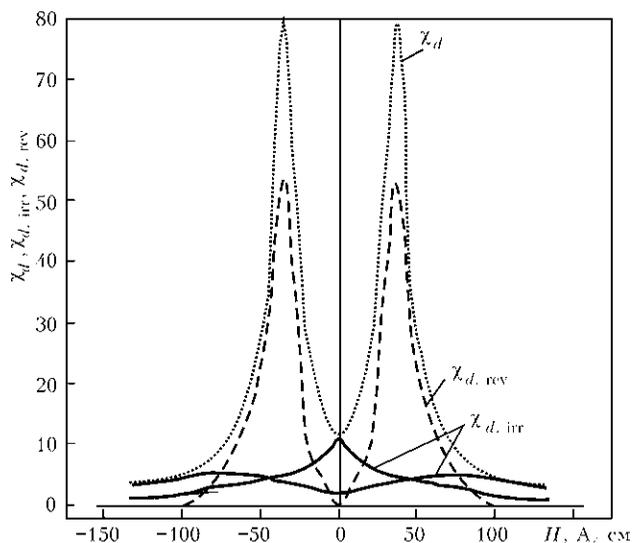


Рис. 2. Петли гистерезиса для дифференциальных магнитных восприимчивостей заклучного образца из стали 75 Г: предельной  $\chi_d$  (пунктирная линия), необратимой  $\chi_{d,\text{rev}}$  (штриховая) и обратной  $\chi_{d,\text{irr}}$  (сплошная)

результатирующей задерживающей силы  $\partial E_f / \partial z \sim H$ , действующей на нее со стороны дефектов решетки, от положения  $z$  ДГ в кристалле (рис. 3, слева). На рис. 3, справа представлена единичная петля гистерезиса  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow \dots \rightarrow k \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow n$  локального объема ферромагнитного кристалла, обусловленная смещением единичной ДГ. Максимум  $m$  определяет максимальное критическое поле (отличие от [26] мы полагаем здесь — релаксационную коэрцитивную силу) локального участка кристалла. Дополним указанные зависимости схемой (рис. 4), где представлено нормальное распределение критических полей (вершин типа  $m$  кривых  $AmB$  из рис. 3, слева) и сами кривые. Точки  $B$  1–7 всех кривых совмещены, в предположении, что при перемагничивании все ДГ начинают двигаться практически одновременно. На рисунке  $\Delta N_{cr}$  есть число необратимо сместившихся ДГ при увеличении перемагничивающего поля от  $H_c$  до  $H_r$ . О нем будет сказано ниже.

Рассмотрим процесс перемагничивания.

При отключении намагничивающего поля намагниченность обратимо уменьшается от насыщения  $M_s$  до величины остаточной намагниченности  $M_r$ . Здесь все  $N$  доменов пока сохранили положительную намагниченность.

При возрастании магнитного поля от нуля до  $H_c$  претерпевают необратимые скачки  $N_c$  границ и столько же микрообъемов приобретают отрицательную намагниченность, не претерпевших таких скачков осталось  $N - N_c$  ДГ.

При отключении магнитного поля, равного коэрцитивной силе кристалла, вследствие обратимого смещения  $m \rightarrow B$  оставшиеся  $N - N_c$  ДГ оказываются в равновесных состояниях (точка  $B$  на рис. 3) и появляется вторичная остаточная намагниченность  $M_{rc}$ .

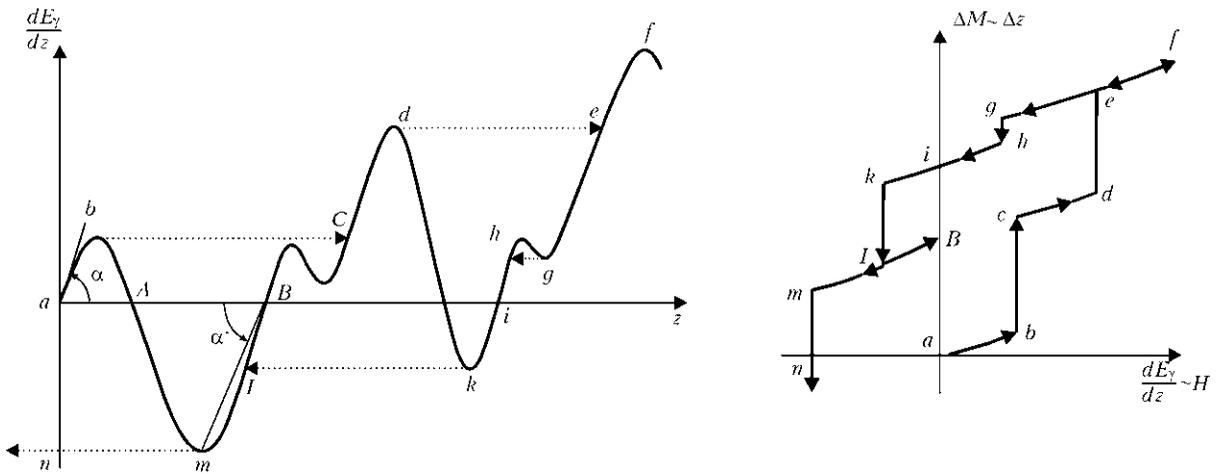


Рис. 3. Схематические изображения зависимости результирующей задерживающей силы  $dE_\gamma/dz \sim H$ , действующей на ДГ со стороны дефектов решетки, от положения ДГ в кристалле (слева) и петли микрогистерезиса при смещении единичной 180°-й ДГ (справа) [26]

При дальнейшем увеличении магнитного поля от  $H_c$  до  $H_r$ , некоторое количество  $0,5\Delta N_{cr}$  границ с одной стороны 1 (рис. 5) необратимо смещается до встречи с аналогично движущимися к ним границами доменов числом  $0,5\Delta N_{cr}$  с другой стороны 3, намагниченность в которых имеет такую же ориентацию (в целом при увеличении поля от  $H_c$  до  $H_r$ , необратимо с двух сторон смещается  $\Delta N_{cr}$  ДГ). При этом встретившиеся ДГ аннигилируют и промежуточные домены 2, имевшие противоположную ориентацию намагниченности, «поглощаются» растущими доменами 1 и 3. В поле  $H_r$  в кристалле содержится  $N - N_c - \Delta N_{cr} = 0,5N$  ДГ, сохранивших положительную ориентацию намагниченности, и  $N_c + \Delta N_{cr} = 0,5N$  объемов исходной величины с отрицательной ориентацией. Среднее расстояние, на которое смещаются эти границы, равно  $mn \approx \Delta z$ , что приводит к возрастанию намагниченности от 0 до  $M_{Hr}$ .

При отключении магнитного поля  $H_r$  в положении равновесия (точка B, рис. 3) опять обратимо возвращаются  $N - N_c - \Delta N_{cr} = 0,5N$  сместившихся

до точек, близких к  $m$  (рис. 3) в пределах задерживающих их препятствий, но не «сорвавшихся» с них границ. Находящиеся между ними домены намагничены положительно. При этом в перемангнитенном состоянии с отрицательной намагниченностью остается объем, равный  $(N_c + \Delta N_{cr} = 0,5N)$  объемам исходных доменов. Результирующая намагниченность убывает от  $M_{Hr}$  до 0.

Разность между  $M_{rc}$  и  $M_{Hr}$  как и между  $H_c$  и  $H_r$ , определяется числом  $\Delta N_{cr}$  границ и расстоянием  $\Delta z_{rc}$ , примерно равным половине средней ширины виртуальных скоплений дефектов в ДГ, образованным флуктуацией их числа в кристалле. При этом  $\Delta N_{cr}$  и  $\Delta z_{rc}$  зависят от структуры металла.

Таким образом, число критических полей  $N_c$ , соответствующее  $H_c$ , не является максимальным. Таковым ( $0,5N$ ) оно становится в магнитном поле, равном  $H_r$ , где количества объемов с положительной и отрицательной намагниченностью сравниваются. Поэтому именно  $H_r$  следует вычислять по формуле, используемой в [26] для  $H_c$ :

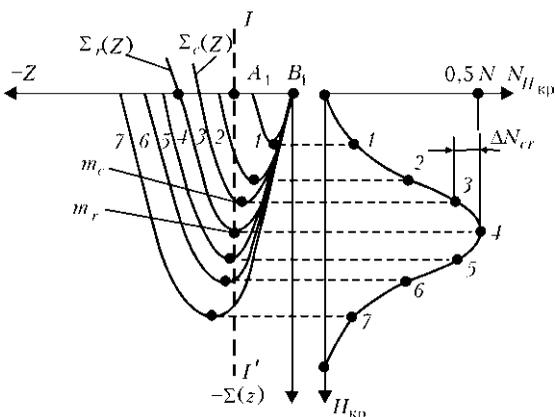


Рис. 4. Кривая распределения критических полей в кристалле: I-I' — ДГ;  $\Sigma_c(z), \Sigma_r(z)$  — пики задерживающей ДГ силы  $dE_\gamma/dz$  (см. рис. 3), соответствующие коэрцитивной и релаксационной силам кристалла

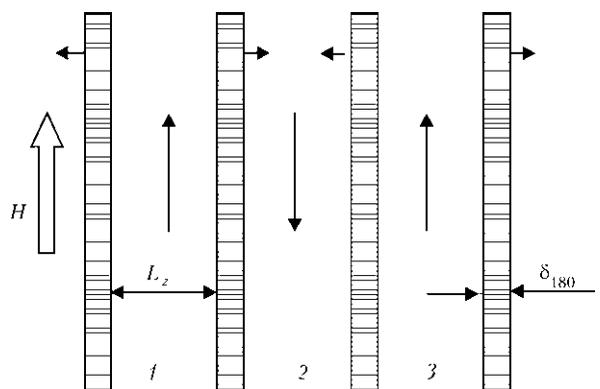


Рис. 5. Схема процессов смещения ДГ в кристалле



$$H_r = \frac{1}{2\mu_0 M_s S_\delta \cos\varphi} \left| \left( \frac{dE}{dz} \right) \right|_{\max}^i, \quad (2)$$

где  $dE$  — изменение энергии при перемагничивании объема  $dV = L_x L_y dz$  вследствие смещения  $i$ -й ДГ площадью  $S_\delta = L_x L_y$ ;  $M_s$  — намагниченность насыщения;  $\varphi$  — угол между направлениями поля и намагниченности;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Формула (2) соответствует случаю, когда ось  $z$  параллельна нормали к ДГ.

Как уже упоминалось, на рис. 4 показано нормальное распределение критических полей в ферромагнитном кристалле. Кривая  $\Sigma_r(z)$  в максимуме  $m$  кривой распределения  $N_{H_{кр}}^{\max}$  соответствует релаксационной коэрцитивной силе. Коэрцитивную силу представляет кривая  $\Sigma_c(z)$ , максимуму которой соответствует  $N_{H_{кр}}^{\max} - \Delta N_{cr}$  сместившихся необратимо ДГ.

Таким образом, разработанная в работах [2–25] и др. теория относится именно к релаксационной коэрцитивной силе. Петлю гистерезиса  $M_{irr}(H)$ , обусловленную одними необратимыми изменениями намагниченности, следует считать первичной. Наложение на нее другой петли  $M_{rev}(H)$ , отражающей обратимые процессы, приводит к основной предельной петле гистерезиса, получаемой в эксперименте.

Если принять данный вывод, то связь коэрцитивной силы с релаксационной отражает формула [27]:

$$\begin{aligned} H_c &= H_r \left( 1 - 2\sqrt{\pi} \frac{\Delta N_{rc}}{N} \right) = \\ &= H_r \left[ 1 - 2,55 \frac{l_{эфф}}{L_z} \ln \left( \frac{L_z}{2l_{эфф}} \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $l_{эфф}$  — среднее эффективное расстояние, на котором ДГ взаимодействует с единичным дефектом;  $L_z$  — ширина домена (размер домена в направлении смещения ДГ);  $\delta_{180}$  — толщина 180°-ной ДГ.

Значение  $\Delta N_c/N$  было получено в работе [27]. Для крупных неферромагнитных включений сферической формы диаметром  $d_b$  ( $d_b \gg \delta_{180}$ )  $l_{эфф} = d_b/2$ , для мелких ( $\delta_{180} \gg d_b$ )  $l_{эфф} = \delta_{180}/2$ , для краевых дислокаций плотностью  $r$   $l_{эфф} \approx 0,5r^{-1/2}$ .

**Анализ петли гистерезиса, обусловленной необратимыми процессами.** Рассмотрим кристалл, представляющий собой ферромагнитную матрицу со статистически распределенными неферромагнитными включениями (НВ) сферической формы. Полагаем, что при перемагничивании

смещаются плоские 180°-ные ДГ и при движении они не изгибаются. Размеры НВ значительно меньше толщины ДГ.

Критические поля для ДГ обусловлены флуктуациями числа частиц в пределах всего объема ДГ [20–22]. Эти флуктуации можно представить как некоторые виртуальные объемы, созданные условно собранными в одном месте всеми дефектами, находящимися в ДГ. При этом флуктуации могут быть образованы также различной ориентацией линейных дефектов решетки (дислокаций) внутри ДГ и их случайным распределением в разных ее участках.

Для количественного описания спинки петли гистерезиса  $M_{irr}(H)$  введем величину  $M_i$  — изменение намагниченности образца за счет необратимого смещения всех ДГ, имеющих одинаковые критические поля  $H_{кри} = H_{ri}$ . Тогда намагниченность образца при изменении магнитного поля от  $-\infty$  до  $H$  может быть записана в виде:

$$M_{irr} = \int_{-\infty}^H M_0 f(H_{ri}) dH_{ri} - M_s, \quad (4)$$

где  $f(H_{ri})$  — функция распределения критических полей, обусловленных флуктуациями числа НВ в ДГ при ее смещении;  $M_0$  — константа, которую можно определить из условия нормирования:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(H_{ri}) dH_{ri} = 1 \quad (5)$$

и требования  $M_{-\infty} = M_s$ . Такое вычисление дает результат:  $M_0 = 2M_s$ .

Если в качестве  $f(H_{ri})$  использовать распределение Гаусса [22]:

$$f(H_{ri}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left( -\frac{(H_{ri} - H_r)^2}{2\sigma^2} \right), \quad (6)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение полей  $H_{ri}$  от значения  $H_r$ , то в интервале от  $-M_r$  до  $+M_r$ :

$$M_{irr}(H) = -M_s \cos\varphi + \frac{M_s \cos\varphi}{\sqrt{2}} \operatorname{erf} \left( \frac{H - H_r}{\sqrt{2}\sigma_H} \right), \quad (7)$$

где  $\operatorname{erf}(x)$  — интеграл вероятности;  $\sigma_H = \sqrt{2} H_r$  [28].

Из (7) можно получить выражение для максимальной дифференциальной магнитной восприимчивости, обусловленной одними лишь необратимыми процессами:

$$\hat{\chi}_{d.irr} = \left. \frac{dM_{irr}}{dH} \right|_{H=H_r} = \frac{2M_s}{\sqrt{2}\pi\sigma_H} = \frac{M_s}{\sqrt{\pi}H_r} \approx 0,56 \frac{M_s}{H_r}. \quad (8)$$

Таким образом, в применяемой здесь расчетной модели между шириной петли гистерезиса и

\*Ранее подобный расчет был выполнен в работе [27] для спинки предельной петли гистерезиса.



углом ее наклона в точках  $H_r$  и  $-H_r$  существует функциональная связь (8).

**Эксперимент.** Для экспериментальной проверки описанной модели (8) выберем ранее исследуемый сплав железа с медью [29]. Сплав является дисперсионно твердеющим: при высокотемпературном отжиге (старении) из однородного твердого раствора меди в железе выделяются мелкодисперсные частицы неферромагнитной меди, которые впоследствии укрупняются, а в ферромагнитной матрице вначале увеличивается плотность дислокаций, а при увеличении времени выдержки при старении они перераспределяются и их плотность уменьшается. У некоторых образцов, полученных таким образом размеры медных выделений и их распределение соответствуют расчетной модели.

На рис. 6 приведены зависимости  $M_{irr}(H)/M_s$  от  $H/H_r$  для образцов из сплава Fe–Cu после различных времен выдержки при старении. Образцы (рис. 6, а) отжигались от 5 до 30 и далее до 1440 мин (1 сут); их релаксационная коэрцитивная сила изменялась от 0,96 до 2 А/см. Рис. 6, б соответствует образцу без отжига ( $H_c = 0,96$  А/см) и трем образцам после отжига от 4 до 9 сут (при этом  $H_c$  убывала от 2 до 1, 62 А/см). Согласно (8) прямая линия, соответствующая линейному участку спинки петли гистерезиса, при  $H = H_r$  должна быть наклонена под углом к оси  $H$ , тангенс которого составляет  $\beta = M(0)/M_s \approx 0,56 \approx (M(0) \approx 0,56M_s)$ .

Из рис. 6 видно, что для образцов, состаренных до 1 сут, когда их структура представляла собой железо с различной, но не высокой плотностью дислокаций и мелкими медными выделениями разной дисперсности (рис. 7), кривые размагничивания в области  $H_r$  удовлетворительно соответствуют рассматриваемой здесь модели: практически для всех образцов пунктирная линия пересекает ось ординат в точке  $\beta = 0,56$ . У образца без старения (рис. 6, б)  $\beta \approx 0,37$ , а у образцов после длительного старения  $\beta \approx 0,8$ . Здесь результаты эксперимента уже не отражают исходные положения расчетной модели: в первом случае у образца, не подвергнутого старению, медные выделения практически отсутствуют, однако частицы меди когерентно связаны с матрицей, что приводит к сильным искажениям кристаллической решетки железа и значительным внутренним напряжениям. У образцов после длительного старения структура железной основы сильно фрагментирована и многие выделения находятся на границах ячеек субструктуры.

Согласно результатам, приведенным в работе [27]:

$$\hat{\chi}_d \approx 0,56 \frac{M_s}{H_c}, \quad (9)$$

тогда из выражений (8) и (9):

$$\frac{\hat{\chi}_{d,irr}}{\hat{\chi}_d} \approx \frac{H_c}{H_r}. \quad (10)$$

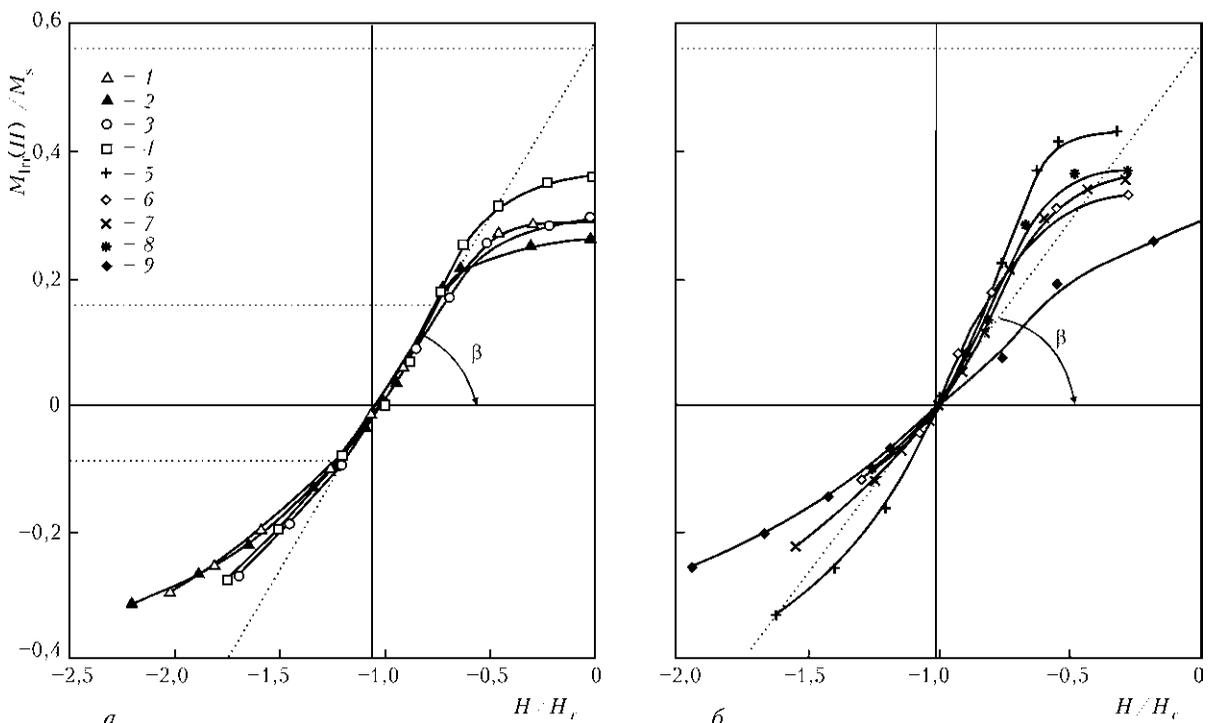


Рис. 6. Спинки петля гистерезиса  $M_{irr}(H)$  образцов из сплава Fe + 2% Cu, предварительно закаленных и подвергнутых старению при 730 °С в течение: а — 5 (1), 10 (2), 30 (3) и 1440 (4) мин; б — 4 (5), 7 (6), 8 (7) и 9 (8) сут

\* На рис. 7, а распределение выделений однородное, расстояния между частицами сравнимы с их размерами, плотность частиц  $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , дислокаций —  $7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ; на рис. 7, б средний размер частиц достигает 100 нм, плотность дислокаций до  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$

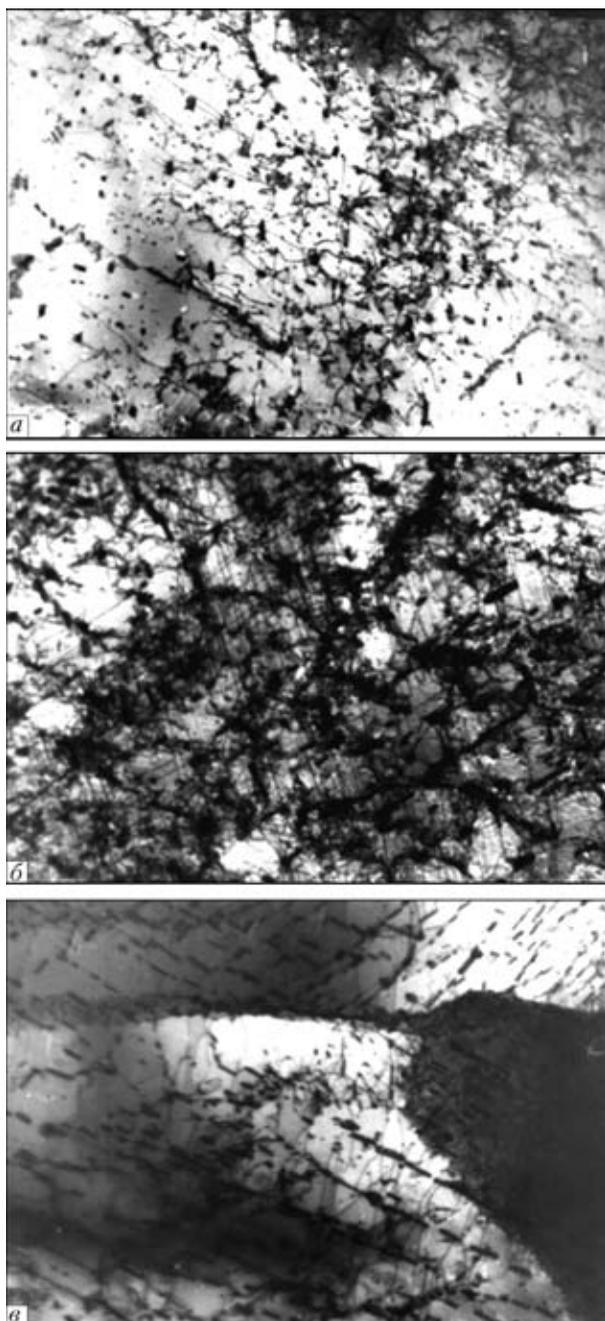


Рис. 7. Электронно-микроскопические снимки ( $\times 13000$ ) структуры образцов Fe + 2 % Si после закалки и различного времени старения при температуре 730 °C: а — 0,5 ч; б — 1 ч; в — 10 мин

На рис. 8 представлены дифференциальные магнитные восприимчивости, соответствующие основной петле гистерезиса  $\chi_d$ , необратимой петле гистерезиса по остаточной намагниченности  $\chi_{d,irr}$  и аналогичной петле за вычетом обратимых изменений намагниченности по кривым возврата\*  $\chi_{d,(irr-rev')}$  отожженной стали 20. Эта сталь имеет ферритно-перлитную структуру с содержанием перлита  $\sim 25$  %. Можно полагать, что процессы перемагничивания в ней протекают в основном пу-

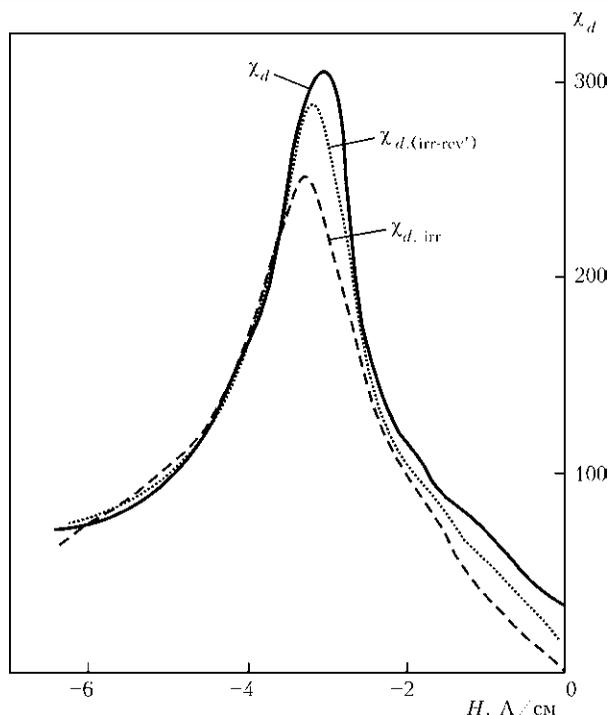


Рис. 8. Полевые зависимости дифференциальных магнитных восприимчивостей отожженной стали 20, соответствующие основной петле гистерезиса  $\chi_d$  (сплошная линия), необратимой петле гистерезиса  $\chi_{d,irr}$  (штриховая) и аналогичной петле за вычетом сугубо обратимых изменений намагниченности по петлям возврата  $\chi_{d,(irr-rev')}$  (пунктирная)

тем смещения ДГ. Здесь  $H_c = 3,45$  А/см,  $H_r = 3,8$  А/см,  $\hat{\chi}_d = 305$  и  $\hat{\chi}_{d,irr} = 250$ . Тогда, согласно (10),  $\hat{\chi}_{d,irr} / \hat{\chi}_d = 0,82$ , а  $H_c / H_r = 0,9$ , что дает удовлетворительное согласование расчета и эксперимента.

### Выводы

Петля магнитного гистерезиса, обусловленная исключительно задержкой необратимого смещения  $180^\circ$ -х ДГ, является первичной. Принятую считать основной экспериментальную петлю гистерезиса получают путем наложения на первичную петлю в каждой ее точке обратимых изменений намагниченности.

Параметром, характеризующим максимальную задержку процессов смещения ДГ в ферромагнетике, является релаксационная коэрцитивная сила, а не коэрцитивная сила.

1. Буда Г. В. О соотношении обратимых и необратимых процессов при намагничивании закаленной и отпущенной стали 75Г // Дефектоскопия. — 2009. — № 4. — С. 8–20.
2. Kersten M., Gottschalt P. Einige Versuche über den Einfluss von Eigenspannungen auf Koerzitivkraft und kritische Feldstärke der Barkhausensprünge // Zs. f. techn. Phys. — 1940. — № 12. — P. 345–352.
3. Kersten M. Grundlagen einer Theorie der ferromagnetischen Hysterese und der Koerzitivkraft. — Leipzig: Verlag Hirzel, 1943. — 56 s.

\*Линия возврата предполагается прямой, касательной к кривой возврата в точке поворота на петле гистерезиса



4. Kersten M. Zur Theorie der ferromagnetischen Hysterese und Anfangspermeabilität // Phys. Zs. — 1943. — № 3/4. — P. 63–67.
5. Kersten M. Über die Bedeutung der Versetzungsdichte für die Theorie der Koerzitivkraft rekristallisierter Werkstoffe // Zs. f. angew. Phys. — 1956. — 8, № 10. — P. 497–502.
6. Кондорский Е. И. К вопросу о природе коэрцитивной силы и необратимых изменений при намагничивании // ЖЭТФ. — 1937. — № 9-10. — С. 1117–1131.
7. Кондорский Е. И. О гистерезисе ферромагнетиков // Там же. — 1940. — № 10. — С. 420–440.
8. Кондорский Е. И. К вопросу о теории коэрцитивной силы сталей // Докл. АН СССР. — 1948. — 63, № 6. — С. 507–510.
9. Кондорский Е. И. К теории коэрцитивной силы мягких сталей // Там же. — 1949. — 63, № 1. — С. 37–40.
10. Кондорский Е. И. К теории коэрцитивной силы и магнитной восприимчивости ферромагнитных порошков (в зависимости от плотности упаковки) // Там же. — 1951. — 80, № 2. — С. 197–200.
11. Кондорский Е. И. Природа высокой коэрцитивной силы мелкодисперсных ферромагнетиков в теории доменной структуры // Изв. АН СССР, Серия физ. — 1952. — 16, № 4. — С. 398–411.
12. Neel L. Effect des cavités et des inclusions sur le champ coercitif // Cahiers de Physique. — 1944. — № 25. — P. 21–44. (Пер. в кн.: Физика магнитных областей / Под ред. С. В. Вонсовского. М.: Иностран. лит., 1951. — С. 215–239.)
13. Neel L. Bases d'une nouvelle théorie générale du champ coercitif // Ann. Univ. Grenoble. — 1947. — 22. — P. 299–343.
14. Neel L. Magnetisme, le champ coercitif d'une roüdre ferromagnétique cubique à grain anisotropies // Comptes Rendus. — 1947. — 224. — P. 1550–1560.
15. Neel L. Nouvelle théorie du champ coercitif // Physica. — 1949. — 15, № 1-2. — P. 225–234.
16. Becker R., Doring W. Ferromagnetismus. — Berlin: Springer Verlag, 1939. — P. 339–357.
17. Dijkstra L. I., Wert S. Effekt of Inclusion of Coerzitive Force of Iron // Phys. Rev. — 1950. — 79, № 6. — P. 979–985.
18. Вицена Ф. По поводу связи коэрцитивной силы ферромагнетиков с внутренними напряжениями // Чехосл. физ. журн. — 1954. — № 4. — С. 419–438.
19. Вицена Ф. О влиянии дислокаций на коэрцитивную силу ферромагнетиков // Там же. — 1955. — № 4. — С. 480–501.
20. Malek Z. Die Abhängigkeit der Koerzitivkraft von der plastischen Deformation // Czech. J. of Physics. — 1957. — 7, № 2. — P. 152–168.
21. Malek Z. A study of the influence of dislokations on some of the magnetic properties of permalloy alloy // Ibid. — 1959. — № 9. — S. 613–626.
22. Kroupa F., Malek Z. Der Einfluss der plastischen Verformung durch Kaltwalzen auf die Koerzitivkraft // Ibid. — 1959. — № 9. — S. 627–637.
23. Pfeiffer K.-H. Mikromagnetische Behandlung zwischen Versetzungen und Blochwänden // Phys. Stat. Sol. — 1967. — 20, № 1. — S. 395–411.
24. Pfeiffer K.-H. Mikromagnetische Behandlung zwischen Versetzungen und Blochwänden // Ibid. — 1967. — 21, № 2. — S. 837–856.
25. Pfeiffer K.-H. Zur Theorie der Koerzitivfeldstärke und Anfangsuszeptibilität // Ibid. — 1967. — 21, № 2. — S. 857–872.
26. Trauble H. Magnetisierungskurve und magnetische Hysterese ferromagnetischer Einkristalle In: Moderne Probleme der Metallphysik, 2, Springer-Verlag. Ed. A. Seeger. — Berlin-Heidelberg-New York, 1996. — S. 157–475.
27. Бида Г. В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. — М.: Маршрут, 2006. — 304 с.
28. Бида Г. В., Галлиев Р. М. Форма петли гистерезиса в модели перемагничивания ферромагнетиков посредством статистически разновременных необратимых смещений междоменных границ // Дефектоскопия. — 1999. — № 12. — С. 25–36.
29. Влияние неферромагнитных включений и структуры металлической основы на релаксационные магнитные свойства сплава Fe-Cu / Г. В. Бида, Э. С. Горкунов, Н. Ф. Вильданова, Т. П. Царькова // Там же. — 1999. — № 2. — С. 18–30.

Поступила в редакцию  
16.03.2011

## НОВЫЕ КНИГИ



### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ.

- Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. - 172 с. Мягкий переплет, 200x290 мм. Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009-2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации. Сборник предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.



### О.В. БЛОЦКИЙ. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА РЕНТГЕНОГРАФІЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ.

- Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. - 224 с. Твердый переплет, 165x235 мм. (укр. яз.). В монографии на основе системных исследований изложены впервые разработанные методические основы и результаты исследования особенностей кинетики фазовых превращений в лучах высокотемпературной рентгенографии металлических материалов. Кинематографические съемки осуществлены на оригинальных конструкциях рентгеновского оборудования. Это обеспечило возможность регистрации полиморфных превращений, диффузионных процессов и изучения температурно-временных условий последовательности образования и распада твердых растворов и химических соединений. Показана доминирующая роль и значение изменений химического состава и физического состояния фазовых составляющих сплавов во время термической и химико-термической обработки как средства управления их структурой и свойствами. Для научно-технических работников, разрабатывающих новые материалы и изучающих их строение и свойства, а также преподавателей, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ СОТОВЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЛЕГКОВЕСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. В. ДЕГТЯРЕВ, канд. экон. наук, А. М. ПОТАПОВ, канд. техн. наук  
(ГП КБ «Южное», г. Днепропетровск)

*Сотовые структуры, состоящие из углепластиковых обшивок и алюминиевых сот, применяются при создании космических аппаратов. Это требует проведения широкого объема исследований их свойств. Приведены примеры исследования физико-механических характеристик этих структур, определения коэффициента теплопроводности и оптических характеристик, газовыделений и описано поведение материала обшивки при воздействии потоков атомарного кислорода, эквивалентных присутствующим на околоземных орбитах. Рассмотрено применение метода электронной ширографии и теплового метода для неразрушающего контроля качества сотопанелей. Проведены исследования по определению степени ослабления электромагнитного излучения и излучения космических электронов сотовыми структурами.*

*Honeycomb structures consisting of coal-plastic shells and aluminium honeycombs, are applied in design of space vehicles. This requires conducting extensive research of their properties. Examples of investigation of physico-mechanical characteristics of these structures, determination of heat conductivity factor and optical characteristics, as well as gas emissions are given, and behaviour of shell material under the impact of atomic oxygen flows, equivalent to those present in near-earth orbits, are described. Application of the method of electron shearography and thermal method for nondestructive testing of honeycomb panel quality is considered. Investigations were conducted to determine the degree of weakening of electromagnetic radiation and space electron emission by honeycomb structures.*

Композиционные материалы, имея высокую удельную прочность, отличаются большим преимуществом перед металлами, что обуславливает их использование в ракетно-космических конструкциях. Однако их применение в космосе возможно после проведения широкого объема исследований по определению свойств материалов.

Объектом исследований являются сотопанели, состоящие из двух углепластиковых обшивок и соединяющих их сот из алюминиевой фольги. Цель работы — исследование характеристик материала для обеспечения применения сотопанелей в космосе (рис.1) в качестве панелей солнечных батарей (СБ) [1] и защитных экранов.

С целью получения минимальной массы сотопанелей из углепластика при выборе оптимальных технологических параметров изготовления, а именно, схемы укладки слоев композита, подбора разрежения углеродных нитей в препреге, количества наносимого клея использовали определение таких характеристик, как предел прочности

при растяжении, предел прочности при испытаниях на отрыв и изгиб.

Испытания проводили на испытательной машине TiraTest 2300. Результаты испытаний образцов из обшивки сотопанелей на растяжение приведены в табл. 1.

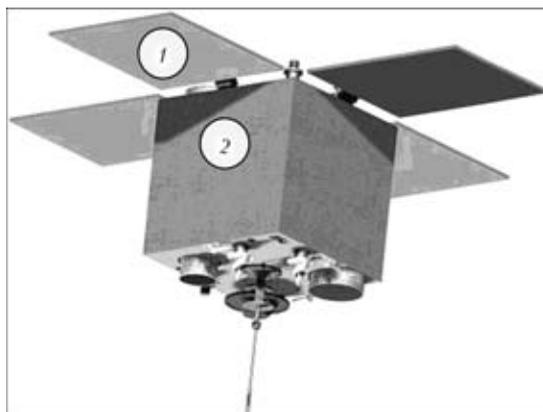


Рис. 1. Панели СБ (1) и экраны (2) космического аппарата «Січ-2» из композиционного материала

Таблица 1. Результаты определения свойств обшивок, предназначенных для изготовления трехслойной панели

Вариант	Наименование материала наполнителя обшивки	Схема укладки, град	Предел прочности при растяжении, МПа	Средняя толщина, мм
1	ТС36S-12К	0; 90	547	0,122
2	ТС36S-12К	0; -45; +45; 90	545	0,165
3	ТС36S-12К	0; 90; 0	895	0,156
4	УКН-5000	0; -45; +45; 90	604	0,192
5	УКН-5000	0; 90	466	0,179



Полученные данные послужили основанием для выбора схемы укладки варианта 1 как имеющего минимальную толщину и достаточную прочность.

В связи с тем, что при изготовлении трехслойных панелей для каркасов СБ существует ограничение по прочности соединения «сотовый наполнитель–обшивка» на отрыв ( $\sigma_{отр} \geq 1 \text{ МПа}$ ), испытывали образцы из панелей, изготовленных с применением различных клеев и различной технологией их нанесения.

Из образцов-свидетелей к каркасам вырезали образцы трехслойной конструкции, имеющие в плане форму правильного шестиугольника со стороной 40 мм. Образцы приклеивали эпоксидным клеем холодного отверждения к технологическим боышкам диаметром 80 мм.

При испытании фиксировалась разрушающая нагрузка образца и отмечался характер разрушения образца: по сотовому наполнителю или между обшивкой и сотовым наполнителем.

Испытания на изгиб проводили по схеме трехточечного изгиба со свободно опертыми краями. При измерении деформаций (прогибов) для определения удельной жесткости образцы нагружались пуансоном радиусом 10 мм и опирались на опоры радиусом 15 мм (рис. 2). Прогиб при этом фиксировался по перемещению траверсы нагружающей опоры примерно до 80 % разрушающей нагрузки. База образцов (расстояние между опорами) составляла 360 мм.

В настоящей работе для изготовления облегченных трехслойных сотовых панелей использовали жидко-вязкий эпоксидный клей холодного отверждения марки Эпофлекс-04. Для оценки эффективности использования клея Эпофлекс-04 предварительно проводили его экспериментальную отработку с учетом предлагаемых конструктивно-технологических решений.

Установлено, что клей Эпофлекс-04, имея тиксотропные свойства, практически не стекает с сотозаполнителя (СЗ) на поверхность обшивки. При

изготовлении облегченных сотовых панелей клей Эпофлекс-04 наносили как на торцы СЗ, так и на углепластиковые обшивки.

Поскольку уменьшение расхода клея является одним из важных путей снижения массы трехслойных панелей, было установлено влияние нанесения клея на СЗ ( $x_1$ ) и обшивки ( $x_2$ ) на прочность сотовых панелей при изгибе и отрыве. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, в опыте № 4 достигнуто минимально допустимое значение прочности соединения «СЗ-обшивка» на отрыв, для которого значения исследованных факторов составляют 56 г/м<sup>2</sup> для  $x_1$  и 32 г/м<sup>2</sup> для  $x_2$ .

По результатам испытаний получено, что при минимально допустимом значении  $\sigma_{отр}$  разрушение образцов происходило с отрывом СЗ с клеевыми галтелями от обшивки, а при большем расходе клея и, как следствие, более высоком значении  $\sigma_{отр}$  (более 1,2 МПа) картина разрушения образцов изменилась, качество соединения обшивка — СЗ улучшилось и образцы разрушались по сотам. Было выбрано, что оптимальными значениями исследованных факторов следует считать значения опыта № 2.

Использование сотопанелей в качестве защитных тепловых экранов требует знания теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , степени черноты  $\varepsilon$  и интегрального коэффициента поглощения  $A_s$ .

Определение эффективной теплопроводности проводилось на трехслойной сотовой конструкции с обшивками из углепластика ЭЛУР-08+ЭДТ-10П и наполнителем из алюминиевой фольги с размерами грани сот 6 мм и высотой 12 мм.

Используемая методика определения теплопроводности в нестационарном режиме основана на регистрации роста температуры теплоприемника, нагреваемого тепловым потоком, проходящим через исследуемый образец, на боковой поверхности которого поддерживается нулевой тепловой поток (теплоприемник теплоизолирован от окружающей среды).

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Теплопроводность трехслойной углепластиковой конструкции монотонно возрастает от 0,14 Вт/(мК) при 20°C до 0,30 Вт/(мК) при 130 °С.

Таблица 2. Результаты испытаний на изгиб и отрыв образцов сотовых панелей с различным количеством нанесенного клея

Номер опыта	$x_1$ , г/м <sup>2</sup>	$x_2$ , г/м <sup>2</sup>	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{отр}$ , МПа
1	74	38	17,2	1,27
2	68	36	16,7	1,20
3	62	34	15,7	1,12
4	56	32	15,0	1,04
5	50	30	14,2	0,96



Рис. 2. Общий вид балочного образца при испытаниях на изгиб

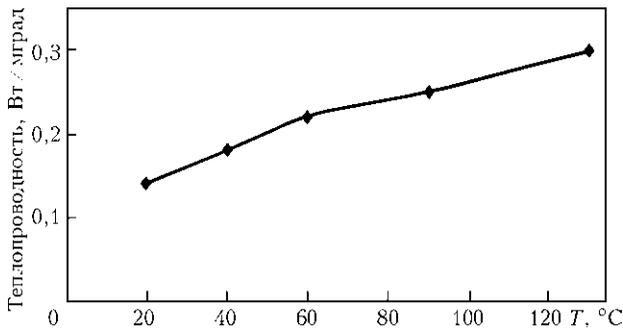


Рис. 3. Зависимость теплопроводности исследуемой сотовой структуры от температуры

Степень черноты (коэффициент излучения в инфракрасной области) углепластика, измеренный с помощью прибора эмиссометра модели АЕ-1, находится в диапазоне 0,74...0,9.

Интегральный коэффициент поглощения  $A_s$ , измеренный фотометром ФМ-59 в области длин волн 0,3...2,4 мкм, составляет 0,9.

Проведенные тепловые расчеты КА показывают, что уровень теплофизических и термооптических характеристик сотовой панели с углепластиковыми обшивками и алюминиевым сотозаполнителем, обеспечивает требуемые температуры в рабочих зонах аппарата.

Важным параметром, определяющим дальнейшее использование изготовленной сотовой панели, является коробление, т. е. отклонение поверхности обводов панелей выше допустимых [2]. Форма каркаса СБ и технология изготовления обеспечивали отсутствие коробления после изготовления. Техническими требованиями задано, что в условиях эксплуатации при перепаде температур между верхней и нижней обшивками в 8 °С, прогиб каркаса не должен превышать 0,1 мм на 100 мм длины.

Каркас размером 694×576 мм испытывался в условиях теплового нагрева лучистым и конвективным потоками с наружной стороны над массивной разогретой стальной плитой с конвективным теплообменом внутри трехслойной конструкции.

В результате испытаний получено, что при разности температур между обшивками в 10 °С прогиб каркаса составил 0,4 мм, что на 100 мм длины составляет величину < 0,1 мм, т. е. результаты испытаний показали, что прогиб каркаса соответствует заданным требованиям по тепловому короблению.

Для обеспечения чистоты оптических поверхностей приборов все неметаллические материалы КА при нагреве до 125 °С в течение 24 ч в вакууме должны иметь строго регламентированный уровень газовой выделенности, включающий общую потерю массы (не более 1 %) и количество летучих конденсирующихся веществ (не более 0,1 %). Для рассматриваемых сотовых панелей эти параметры определялись в соответствии с ECSS-Q-70-02А и составляли соответственно 0,66 и 0,09 % [3].

На низких околоземных орбитах необходимо учитывать эрозию материалов под действием атомарного кислорода.

Параметры потока атомарного кислорода на орбите для высоты порядка  $z \approx 700$  км следующие, атом/(см<sup>2</sup>·год):  $\Phi_O^{\text{ном}} \approx 1 \cdot 10^{19}$ ;  $\Phi_O^{\text{max}} \approx 3 \cdot 10^{20}$ ;  $\Phi_O^{\text{min}} \approx 5 \cdot 10^{16}$ .

Для максимальных значений интегральных флюенсов атомарного кислорода, соответствующих пяти- и десятилетним срокам эксплуатации СБ, атом/см<sup>2</sup>:  $F_O^{\text{max}} \approx 1,5 \cdot 10^{21}$ ;  $F_O^{\text{max}} \approx 3 \cdot 10^{21}$ ;

для номинальных условий эксплуатации, атом/см<sup>2</sup>:  $F_O^{\text{ном}} \approx 5 \cdot 10^{19}$ ;  $F_O^{\text{ном}} \approx 1 \cdot 10^{20}$ .

Воздействие потока атомарного кислорода на углепластик ЭЛУР 0,08+ЭДТ-10 проводили на плазмозлектродинамическом стенде [4]. После испытаний определяли изменение весовых и термооптических характеристик углепластика (см. табл.3).

После воздействия атомарного кислорода наблюдается увеличение как коэффициента поглощения  $A_s$ , вызванное потерей блеска углепластика из-за уноса полимерной матрицы, так и коэффициента излучения  $\epsilon$ , вызванное повышением степени шероховатости поверхности.

Для обеспечения качества сотовой панели подвергается неразрушающим испытаниям для определения внутренних дефектов. Характерным дефектом для сотовой панели является неприклеив обшивки к сотам.

Для отработки методов неразрушающего контроля выбрано два бесконтактных метода неразрушающего контроля: метод электронной широкографии [5] и тепловой [6].

Метод электронной широкографии позволяет зарегистрировать неравномерности деформации объекта контроля, для чего объект необходимо осветить когерентным источником света и приложить механическую или тепловую нагрузку к

Таблица 3. Дegrадация весовых и термооптических характеристик углепластика в потоке атомарного кислорода

Номер образца	Измеряемые характеристики материалов						
	t, ч	F <sub>0</sub> , см <sup>-2</sup>	Удельный унос массы Δm, г/см <sup>2</sup>	A <sub>s</sub>		ε	
				до экспозиции	после экспозиции	до экспозиции	после экспозиции
1	20,53	1,07·10 <sup>21</sup>	2,676·10 <sup>-3</sup>	0,879	0,957	0,900	0,915
2	2,108	1,16·10 <sup>20</sup>	1,164·10 <sup>-3</sup>	0,879	0,984	0,900	0,900
3	9,67	4,9·10 <sup>20</sup>	2,2·10 <sup>-3</sup>	0,879	0,990	0,900	—

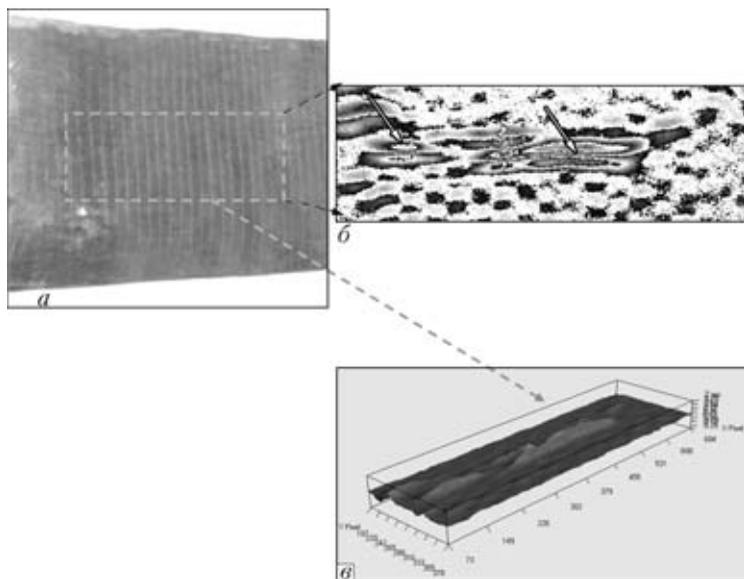


Рис. 4. Контроль качества трехслойной панели методом электронной ширографии: *а* — внешний вид панели; штриховой линией выделена зона контроля; *б* — широграмма выбранной зоны контроля. Стрелками указаны неоднородности деформации, вызванные нарушением клеевого соединения между обшивкой и сотами; *в* — трехмерная картина деформации выбранной зоны контроля

объекту. Изучение деформации объекта позволяет косвенно определить границы или сплошность приклея в многослойных сотовых панелях.

При контроле поверхность объекта условно разбивалась на зоны контроля. К каждой зоне контроля прикладывалась тепловая нагрузка и проводилась запись начального и конечного нагруженного состояния с помощью установки ширографического контроля.

Для выявления неприклея сотовую панель достаточно нагреть на 5...10 °С конвективным или лучевым способом. Нагрев образца вызывает тепловое расширение углепластиковой обшивки, а форма деформации определяется механическими связями между обшивкой и сотами. На рис. 4 показаны результаты сравнения начального и конечного состояния зоны контроля обшивки, что позволяет оценить качество приклея по неравномерности деформации. Нарушение связи между обшивкой и сотами вызывает неоднородность деформации. Обычно области с неоднородной деформацией хорошо видны и реагируют на слабую нагрузку в виде локальных возмущений (рис. 4, б). Трехмерная картина таких возмущений показана на рис. 4, в. Вся обработка сводится к поиску локальных возмущений.

Неразрушающий контроль тепловым методом позволяет оценить качество или сплошность клеевого соединения по распределению температур на поверхности во время теплопередачи. Изучение распределения температур позволяет косвенно определить нарушения клеевого соединения.

Методика контроля в основном состоит из следующих шагов. Поверхность объекта условно раз-

бивается на зоны контроля. Каждая зона контроля нагревается до температуры воздуха у поверхности 60 °С. Предварительно подбирается мощность и длительность нагрева и с помощью установки для теплового контроля (рис. 5) регистрируется с противоположной стороны распределение температур для выбранной зоны. Регистрация представляет собой серию тепловых снимков с заданной периодичностью. Анализ серии снимков позволяет выявить нарушение клеевого соединения в виде нарушения периодического рисунка сот (рис. 6, б).

В местах отсутствия или нарушения клеевого соединения между обшивкой и сотами нарушается тепловой контакт, что выражается в виде уменьшения температуры над клеевым соединением. Обработка сводится к поиску областей с нарушенным тепловым контактом. Отсутствие теплового контакта легко определить, построив тепловой профиль для зоны контроля (рис. 6, в). Тепловой профиль показывает распределение температур в заданном направлении и позволяет сравнивать тепловые контакты, их периодичность и качество. Каждый пик соответствует хорошему тепловому контакту, расстояние между пиками приблизительно соответствует размеру ячейки. Место отсутствия теплового контакта обозначено на рис. 6 вертикальными линиями.

Области с нарушением клеевого соединения, полученные обоими методами, совпадают. Таким образом, методы могут заменять друг друга.

Применение сотопанелей в составе КА в качестве защитных экранов требует проведения исследований ослабления ими электромагнитного и радиационного излучений.

Экспериментальное исследование ослабления энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) со-



Рис. 5. Общий вид установки для теплового контроля: 1 — тепловизор; 2 — ЭВМ



топанелью проводили двумя методами: трактовым (при размещении образца исследуемого материала в коаксиально-волноводном тракте) и в свободном пространстве (или в безэховой камере).

Измерения проводили на образцах с различными параметрами сотового заполнителя с размерами ребра ячейки шестигранниками 1,5, 2,5 мм, высотой 19, 25, 35 мм. Толщина исследуемых углепластиковых обшивок составляла 1...1,4 мм.

Измерение степени ослабления электромагнитного излучения трактовым методом проводили путем прямого измерения отношения мощности на входе и выходе волноводной секции и методом измерения коэффициента передачи четырехполосника с помощью анализатора цепей. Образцы размещались в секции прямоугольного волновода сечением 28,5×12,6 мм.

Экспериментальное исследование ослабления энергии электромагнитного излучения сотовых панелей в свободном пространстве проводилось в безэховой камере с использованием экранирующего стенда, который представляет собой конструкцию с двумя опорами, на которой закреплен алюминиевый экран размером 3000×2000 мм. Общий вид экранирующего стенда представлен на рис. 7. В центре экранирующего стенда размещается испытуемый образец. Щели между образцом и экраном тщательно экранируются специальной лентой с токопроводящим адгезивным слоем.

Результаты экспериментального определения эффективности экранирования ЭМИ приведены в табл. 4.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

– степень ослабления электромагнитного излучения исследуемыми трехслойными сотовыми образцами в диапазоне частот 1...12 ГГц составляет 11...60 дБ. Минимальное значение ослабления наблюдается на более низких частотах исследуемого диапазона частот;

– уменьшение размера ячейки сот приводит к увеличению степени ослабления ЭМИ;

– на образцах, имевших большие геометрические размеры, получены лучшие результаты в сравнении с образцами малых размеров.

Достигнутая эффективность экранирования ЭМИ в полосе частот 1...12 ГГц соответствует требованиям, предъявляемым к экранированным сооружениям I–III-го классов [5]. Таким образом, конструкции сотовых панелей, аналогичные исследуемым, могут быть использованы для обеспечения электромагнитной герметичности КА.

Определение эффективности экранирования радиационного излучения проводилось расчетным и экспериментальным путем. В качестве примера рассмотрим экранирование космических излучений электронов.

Сравнительный анализ эффективности различных материалов, введение которых в состав трехслойных углепластиковых панелей при минимальных затратах массы позволит обеспечить такой же уровень экранирования космических излучений электронов, что и алюминиевая пластина толщиной 2 мм, показал, что наилучшим решением является введение в состав углепластиковых обшивок слоя вольфрама толщиной 50 мкм [7].

Общий вид визуализации прохождения электронов сквозь алюминиевую пластину толщиной 2 мм, трехслойную углепластиковую панель без вольфрамового заполнителя и такую же панель, в углепластиковые обшивки которой введены слои вольфрама толщиной 50 мкм, представлен на рис. 8.

Как видно, частицы с энергией 1 МэВ проникают сквозь исходную панель, в то время как алюминиевая пластина и модифицированная панель экранируют излучение.

Расчетные удельные дозы электронного излучения, накопленные в кремниевой мишени, размещенной за защитами, образованными алюминиевой пластиной толщиной 2 мм, исходной панелью и панелью, в каждую из обшивок которой введены слои вольфрама толщиной 50 мкм, представлены на рис. 9.

Как видим, результаты расчетов полностью подтверждают правильность разработанной схемы улучшения экранирующих характеристик многофункциональных панелей по отношению к радиационным излучениям кос-

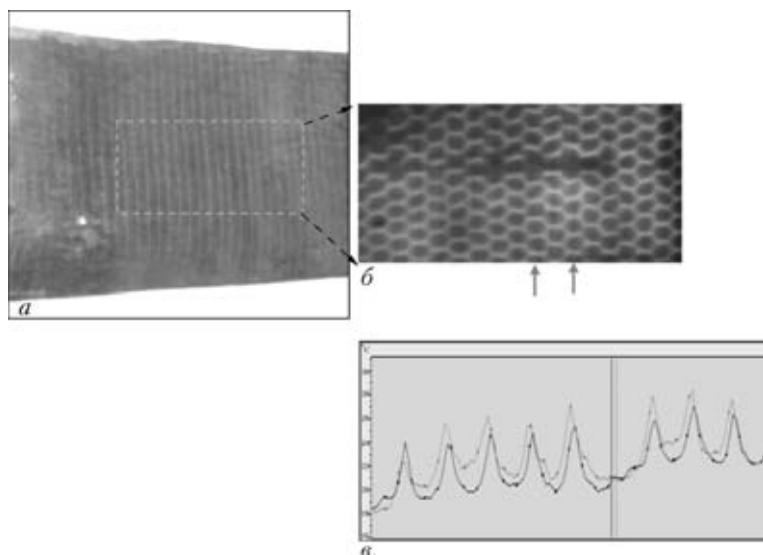


Рис. 6. Контроль качества трехслойной панели тепловым методом: *a* — внешний вид трехслойной панели (пунктиром выделена зона контроля; *b* — тепловой снимок панели (стрелками обозначены направления построения теплового профиля температур); *c* — график двух тепловых профилей

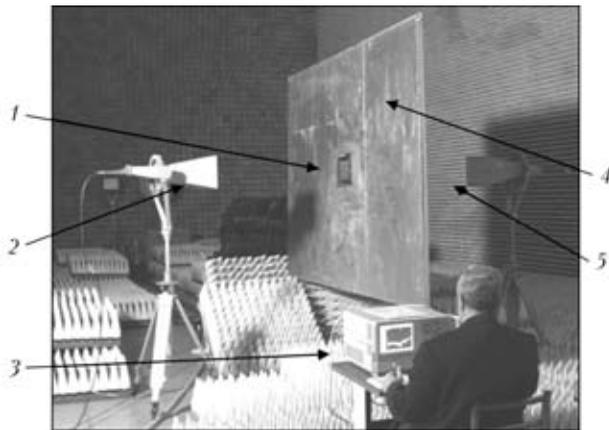


Рис. 7. Общий вид экранирующего стенда, установленного в безъодовой камере: 1 — испытуемый образец; 2 — передающая антенна П6-23А; 3 — анализатор цепей N5230А; 4 — экранирующий стенд; 5 — приемная антенна П6-23А

мического пространства: во всем энергетическом диапазоне, характерном для электронного излучения космического пространства, доза, накопленная за защитой, образованной многофункциональными панелями, в обшивки которых введен вольфрамовый наполнитель, на 6...22 % ниже, чем за алюминиевой пластиной толщиной 2 мм.

Для получения экспериментальных данных и их сравнения с расчетной моделью алюминиевая пластина толщиной 2 мм, исходная сотовая панель и доработанная панель с улучшенными характеристиками экранирования радиационных излучений

были облучены потоками электронов с энергиями 2, 4, 5, 6 и 7 МэВ под различными углами по отношению к нормали к поверхности образца на ускорителе электронов Микротрон М-30.

В ходе каждого единичного испытания определялось значение безразмерного параметра  $D_{st}$ , характеризующего экранирующие свойства образцов в поле электронного излучения, который рассчитывался по формуле

$$D_{st} = D/F,$$

где  $D$  — поток электронов, прошедших сквозь образец;  $F$  — поток электронов на внешней поверхности образца.

Зависимости обработанных таким образом экспериментальных данных от энергии электронов для нулевого угла падения приведены на рис. 10.

Как видим, данные, приведенные на рис. 10, качественно повторяют картину, полученную в результате расчетов с использованием трехмерного моделирования транспорта частиц сквозь материалы образцов. Как и на рис. 9, кривые, характеризующие эффективность экранирования электронного излучения, расположены в следующем порядке: исходная сотовая панель → алюминиевая пластина толщиной 2 мм → панель, в состав углепластиковых обшивок которой введены вольфрамовые слои толщиной 50 мкм. Полученные результаты подтверждают правильность выбора схемы доработки сото-

Таблица 4. Эффективность экранирования ЭМИ материалами сотовых панелей

Размеры образца, мм	Размер ячейки СЗ, мм	Метод измерения эффективности экранирования	Эффективность экранирования, дБ		
			1 ГГц	7,0...8,5 ГГц	11,5 ГГц
28,5×12,6×25	1,5×1,5	отношения мощностей	—	24,8	—
		коэффициента передачи четырехполосника	—	25,1	—
150×125×35	2,5×2,5	в свободном пространстве	11,6	40–47	55
28,5×12,6×19		отношения мощностей	—	20,9	—
		коэффициента передачи четырехполосника	—	19,1	—
265×205×25		в свободном пространстве	16	37–42	46
490×695×25	в свободном пространстве	36	—	60	

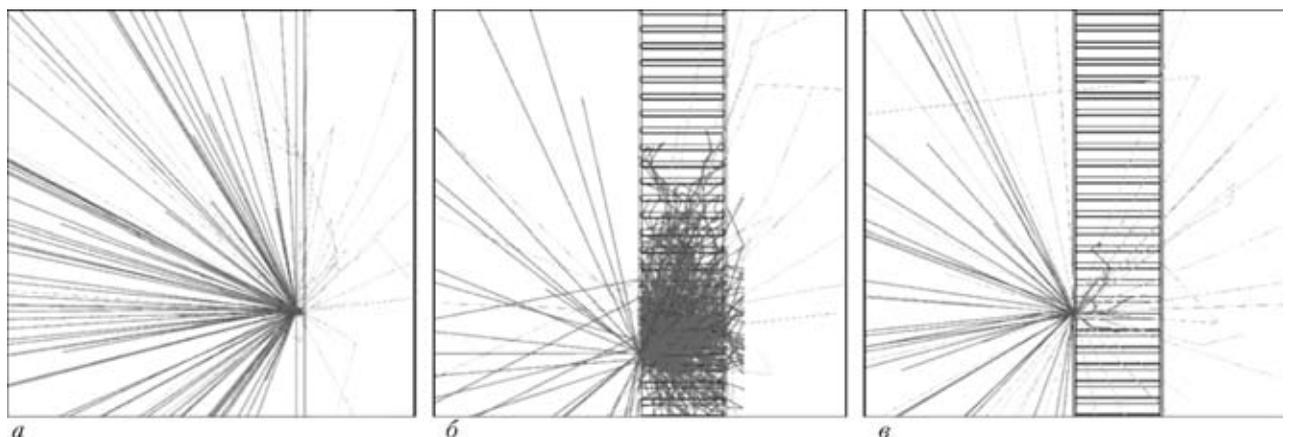


Рис. 8. Прохождение электронов с энергией  $E = 1$  МэВ сквозь образцы при воздействии пучка под углом  $50^\circ$  от нормали к поверхности: а — Al 2 мм; б, в — соответственно исходный и модифицированный образцы сотовой конструкции

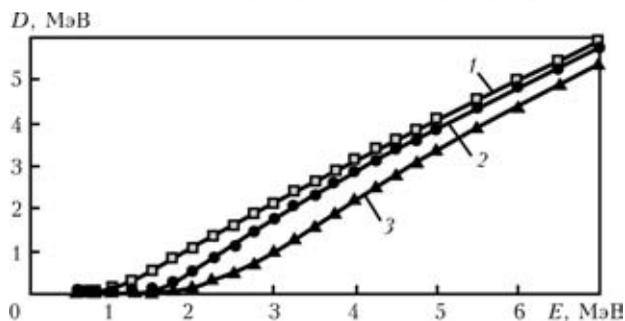


Рис. 9. Доза электронов при падении под нулевым углом: 1 — исходная панель; 2 — алюминий, 2 мм; 3 — панель с вольфрамом

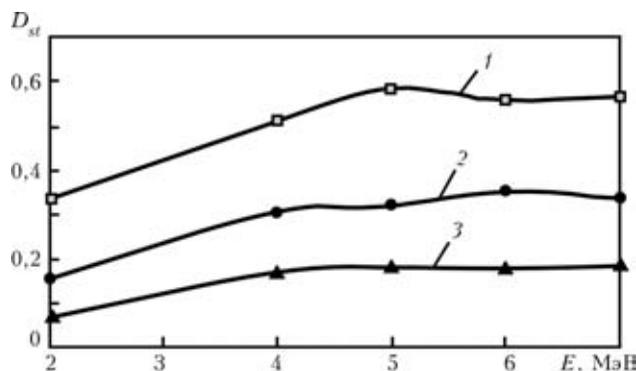


Рис. 10. Зависимость относительной дозы от энергии электронов при нулевом угле падения (обозначения те же, что и на рис. 9)

панелей с целью улучшения их характеристик в части экранирования космических излучений.

Влияние радиационного воздействия на физико-механические характеристики исследуемой модифицированной вольфрамом сотовой структуры проверялось путем облучения панели потоками электронов с энергией 7 МэВ, которые составляли  $6,9 \cdot 10^{14}$ ,  $1,38 \cdot 10^{15}$ ,  $2,76 \cdot 10^{15}$ ,  $1,1 \cdot 10^{16}$  и  $4,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Накопленные дозы составили соответственно 22, 44, 88, 320 и 1400 Мрад. После облучения определялось разрушающее напряжение при равномерном отрыве обшивки, которое колебалось в пределах

2,0...2,9 МПа и практически не зависело от поглощенной дозы. Таким образом, вплоть до дозы  $1,4 \cdot 10^3$  Мрад ионизирующее излучение не влияет на разрушающее напряжение при отрыве обшивок от сотового заполнителя.

### Вывод

Таким образом, композиционные материалы на основе углепластиков могут быть не только конструктивными материалами, но и выполнять теплоизоляционные и радиационнозащитные функции, обеспечивать электромагнитную совместимость электронной аппаратуры, что обуславливает их широкое применение в ракетно-космической технике.

1. ГОСТ 30373-95. Межгосударственный стандарт: Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. — Киев: Госстандарт Украины, 2002.
2. Тихий В. Г., Примаков В. Д., Судницин В. В. Исследование тепловой деформативности каркасов панелей солнечных батарей для микроспутников // Космическая техника. Ракетное вооружение. — Науч.-техн. сб. ГП «КБ «Южное», 2006. — Вып. 1-2. — С. 168-177.
3. Газовыделения неметаллических материалов космического аппарата «Сич-2» / Ю. А. Меленевский, В. Г. Тихий, А. М. Потапов и др. // Там же. — 2012. — Вып. 1. — С. 86-98.
4. Деградация полимерных материалов обшивок солнечных батарей КА при длительном воздействии потоков атомарного кислорода / В. А. Шувалов, В. Г. Тихий, А. И. Приймак и др. // Космічна наука і технологія. — 2005. — 11, № 5/6. — С. 78-86.
5. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широгографии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008 — № 4. — С. 7-13.
6. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. — Киев: Техніка, 1988. — 125 с.
7. Улучшение характеристик углепластиковых сотовых конструкций для защиты от ионизирующих излучений / О. В. Доценко, В. Т. Маслюк, В. Б. Тарасов и др. // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 4. — С. 58-71.

Поступила в редакцию  
05.05.2012

### НОВАЯ КНИГА



### МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

— Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с. Твердый переплет, 200×290 мм.  
Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее, преимущественно в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов.

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



## РОЗДІЛЬНИЙ ВИХРОСТРУМОВИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТІВ І ТОВЩИНИ ФАРБОВОГО ПОКРИТТЯ

С. М. МАЄВСЬКИЙ, д-р техн. наук (Нац. техн. ун-т України «Київський політехнічний інститут»)

*Розроблена схема вихрострумowego дефектоскопу з використанням двох однакових резонансних контурів — одного на основні котушки індуктивності вимірювального вихрострумowego перетворювача, а іншого — на основі допоміжної котушки індуктивності. Відрізняється простотою настроювання частоти задаючого генератора та роздільною індикацією за знаком вихідної напруги як поверхневого дефекту матеріалу об'єкта контролю, так і зазору між поверхнею цього матеріалу та вимірювальним перетворювачем. Висока чутливість дефектоскопу до поверхневих дефектів має місце завдяки використанню напівзамкнутого феритового магнітопроводу, що концентрує електромагнітний потік котушки вихрострумowego вимірювального перетворювача для збудження в об'єкті контролю вихрових струмів в зоні обмежених розмірів.*

*Circuit of eddy current flaw detector was developed, using two similar resonance circuits - one based on induction coil of measuring eddy current converter, and the other - based on an additional inductance coil. It features the simplicity of setting up the driving generator frequency and separate indication by output voltage sign of both the surface defect of examined object material and the clearance between this material surface and measuring converter. High sensitivity of flaw detector to surface defects is due to application of half-closed ferritic magnet core, which concentrates the electromagnetic flux of the coil of eddy current measuring converter to excite eddy currents in the examined object in a zone of limited dimensions.*

Для контролю виробів з алюмінію і його сплавів, а також виробів з титану широко застосовується вихрострумований контроль, особливо у сучасній авіаційній техніці для виявлення небезпечних поверхневих дефектів тонких дюралевих листів, що використовуються як обшивка фюзеляжу та площин крил літака, елементів конструкції літаків з титану.

Основною проблемою реалізації подібного контролю є те, що вплив дефекту на зміну вихідної напруги вихрострумowego перетворювача (ВСП) збігає за знаком зміни напруги внаслідок існування навіть невеликого прозору між котушкою перетворювача і поверхнею об'єкта контролю. До того ж такий прозорі завжди існує, адже поверхня фюзеляжу і крил вкривається непровідною фарбою і товщину цього покриття теж доцільно контролювати.

Відома розробка фірми «Інститут доктора Фьостера» (ФРН) [1] вихрострумowego дефектоскопу з включенням ВСП до складу резонансного контуру двохконтурного генератора з частотою  $f > 1$  МГц, що дозволяє відповідним вибором частоти генерації розділити знак зміни вихідної напруги генератора для випадку впливу дефекту чи прозору. Певним недоліком такої генераторної схеми включення ВСП є складність настроювання частоти генератора та можливість зриву генерації внаслідок впливу параметрів матеріалу об'єкта контролю, наприклад, градієнтів його провідності.

В даній роботі наведені результати розробки високочутливого ВСП та схеми вихрострумowego дефектоскопу, в якому також досягнуто розділен-

ня за знаком вихідної напруги при індикації дефекта (поверхневої тріщини) та зміні величини прозору. Зрозуміло, що чутливість ВСП до дефектів мінімального розміру досягається за рахунок зменшення об'єму зони існування вихрових струмів у середовищі матеріалу об'єкта контролю, що можливо при використанні таких же обмежених за розмірами котушок індуктивності ВСП. В свою чергу низьке значення індуктивного опору перетворювача для отримання необхідної чутливості вимагає підвищення частоти струму для їх живлення.

Розроблений ВСП (рис. 1) складається з двохшарової котушки індуктивності з внутрішнім діаметром 1 мм та такою ж довжиною, яка розміщується на центральному осерді майже замкнутого феритового магнітопроводу таким чином, щоб поле розсіювання цієї котушки повністю використовувалось для взаємодії з провідним середовищем об'єкта контролю, відтворюючи в ньому вихрові струми. Діаметр мідного дроту котушки індуктивності становить 0,086 мм, число витків 18. При цьому індуктивність котушки становить 3...4 мкГн, що дозволяє на частоті струму у котушці ВСП біля 1 МГц виявляти в дюралевих листах поверхневі дефекти (тріщини) довжиною 0,5 мм, глибиною 0,1 мм та розкритом від 1 мкм.

З метою усунення залежності результату контролю від кута нахилу вісі перетворювача  $\alpha$  відносно нормалі до поверхні об'єкта контролю у межах  $\pm 30^\circ$  центральна частина фериту (осердя) зроблена видовженою приблизно на 1...1,2 мм. Як показують реальні заміри при такому видовженні центрального стрижня фериту індуктивність котушки перетворювача практично не за-

лежить від кута нахилу його вісі у зазначених кутівих межах (рис. 1, б).

Наведемо реальні результати дослідження такого ВСП при його роботі у складі височастотного (1 мГц) вихрострумowego дефектоскопу. Індуктивність перетворювача становить 3,806 мкГн. При встановленні перетворювача на поверхню виробу з дюралюмінію марки А1 його індуктивність зменшується за рахунок взаємодії поля котушки з полем вихрових струмів і становить 3,555 мкГн. Проходження перетворювачем дефекту (тріщини) з зазначеними вище розмірами приводить до зростання індуктивності на 0,043 мкГн, тобто на 1,2 %. Встановлення ВСП на поверхню сталюого зразка (Ст3) приводить до зростання індуктивності перетворювача до 3,925 мкГн. Зміна індуктивності в напрямку зростання від наявності тріщини з аналогічними розмірами становить 0,122 мкГн, тобто індуктивність зростає на 3 %.

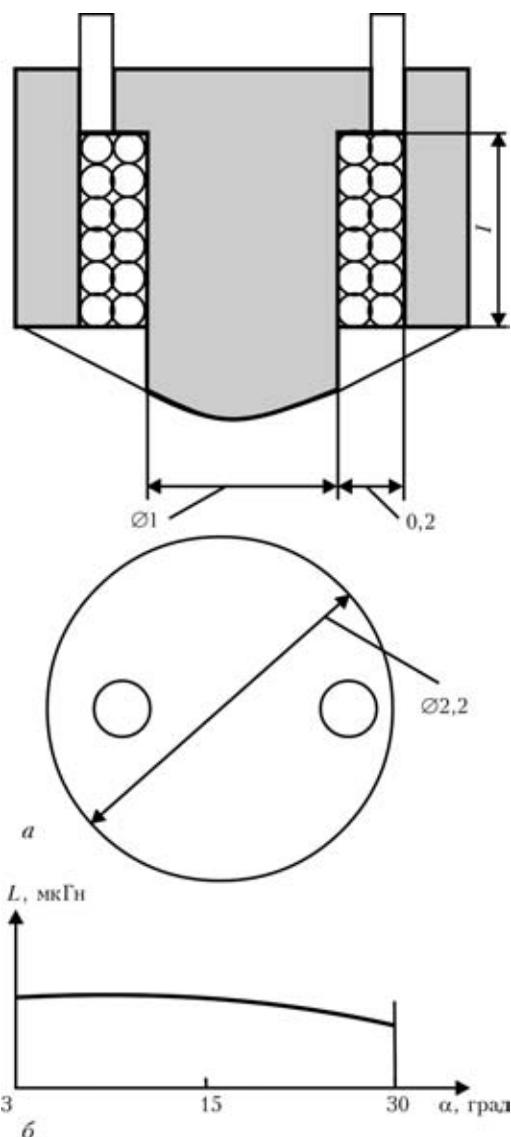


Рис. 1. Схематичне зображення ВСП (а) та залежність індуктивності ВСП від кута нахилу його вісі відносно нормалі до поверхні об'єкта контролю (б)

Наведені дані свідчать про те, якими невеликими приростами параметрів перетворювача необхідно оперувати, щоб виявляти і класифікувати дефекти. Такого ж рівня зміни індуктивності та опору котушки перетворювача мають місце і при зміні величини зазору між перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю, наприклад, при зміні товщини фарбового покриття та локальних градієнтах провідності, що особливо часто спостерігається при контролі сталюих силових конструкцій, які зазнали утоми металу (мікроструктурних деградацій на кристалічному рівні).

Для максимального спрощення налаштування на необхідне значення робочої частоти, при якій має місце розділення за знаком приросту напруги на ВСП під впливом на неї поверхневого дефекту (тріщини) або зміни величини зазору між перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю крім котушки індуктивності згаданого вище перетворювача використано таку ж додаткову котушку індуктивності (ДКІ), що не взаємодіє своїм електромагнітним полем з провідним середовищем. При цьому котушка ВСП і додаткова котушка включені до складу однакових за добротністю паралельних резонансних контурів з підключенням до кожного з них напруги генератора.

Функціональна схема подібної системи вихрострумowego контролю представлена на рис. 2, де котушка індуктивності ВСП і допоміжна котушка індуктивності представлені їх схемами заміщення — послідовним включенням однакових індуктивностей  $L$  та їх активних опорів  $r$ . На рис. 3, а наведена векторна діаграма напруг ВСП з урахуванням внесеної до котушки індуктивності ВСП реактивної та активної напруг за рахунок взаємної індуктивності витків котушки ВСП з віртуальними витками вихрових струмів у середовищі об'єкта контролю.

Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) чотирьохполосників на основі резонансних контурів представлені на рис. 3, б. Крива 1 відповідає частотній характеристиці чотирьохполосника на основі допоміжної котушки індуктивності, крива 2 — частотній характеристиці чотирьохполосника на основі ВСП, котушка індуктивності якого взаємодіє своїм електромагнітним полем з матеріалом об'єкта контролю, що супроводжується зменшенням її індуктивного та підвищенням активного опорів за рахунок відповідних опорів внесених полем індуктивності вихрових струмів в провідному матеріалі об'єкта.

Значення робочої частоти задаючого генератора  $\Gamma$  (рис. 2)  $\omega_{\text{роб}}$  задаємо, виходячи з рівноваги вихідних напруг на контурі ВСП та на контурі допоміжної котушки індуктивності. На частотній вісі робочій частоті відповідає точка перетину АЧХ контуру ДКІ (крива 1 на рис. 3, б) та АЧХ контуру ВСП (крива 2). Робоча частота  $\omega_{\text{роб}}$  по-

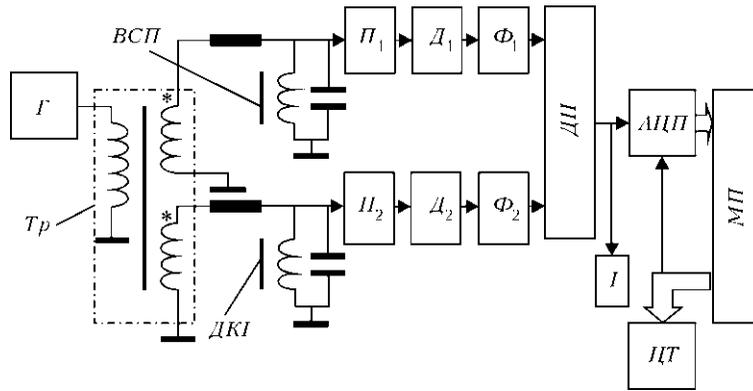


Рис. 2. Функціональна схема вихрострумівий системи контролю: (Г — генератор; Тр — трансформатор; ВСП — вихрострумівий перетворювач; ДКІ — додаткова котушка індуктивності; П<sub>1</sub>, П<sub>2</sub> — повторювачі; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> — детектори (випрямлячі); Ф<sub>1</sub>, Ф<sub>2</sub> — фільтри нижніх частот; ДП — диференційний підсилювач; І — індикатор дефекту; АЦП — аналого-цифровий перетворювач; МП — мікропроцесор; ЦТ — цифрове табло

винна бути меншою за резонансну частоту контуру допоміжної котушки індуктивності.

Згідно векторній діаграмі напруг (рис. 3, а) на активному і реактивному опорів ВСП при контролі діаманітного матеріалу (алюміній та його сплави, титан) вплив поверхневого дефекту (тріщини) пояснюється вектором зміни напруги на котушці ВСП  $P_d$ , а впливу зазору між перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю відповідає вектор зміни напруги  $P_{пр}$ . З експериментальних досліджень відомо, що згадані фактори впливу на зміну напруги на котушці ВСП відрізняються величиною зменшення індуктивного та, головне, активного опорів, що вносяться до котушки індуктивності ВСП електромагнітним полем вихрових струмів у матеріалі об'єкта контролю.

Вплив зазору (рис. 3, а) приводить до приблизно пропорційного зменшення внесених індуктивного і активного опорів, тоді як у випадку впливу поверхневого дефекту матеріалу об'єкта контролю перетворювача (тріщини) відповідно

зменшується індуктивний внесений опір, але практично не зменшується активний внесений опір. Це приводить до того, що при приблизно однакових впливах дефекту і зазору АЧХ контуру робочого ВСП відрізняються добротністю  $Q = (1/r)\sqrt{L_k/C}$  [2].

Таким чином, добротність контуру на основі котушки ВСП у випадку зростання прозіву (АЧХ-4, рис. 3, б) має бути більшою за добротність цього ж контуру при взаємодії поля перетворювача з матеріалом об'єкта контролю у випадку присутності дефекту (тріщини). Існування різної добротності резонансного контуру ВСП при наявності дефекту чи зазору приводить до різного знаку приросту напруги на цьому контурі відносно значення  $U_0$  на робочій частоті  $\omega_{роб}$  (рис. 3, б). Поява дефекту приводить до зростання вихідної напруги контуру ВСП на величину  $\Delta U_d$ , а відповідне зростання зазору, наприклад, за рахунок більшої товщини фарби, викликає зменшення вказаної напруги на величину  $\Delta U_{пр}$ .

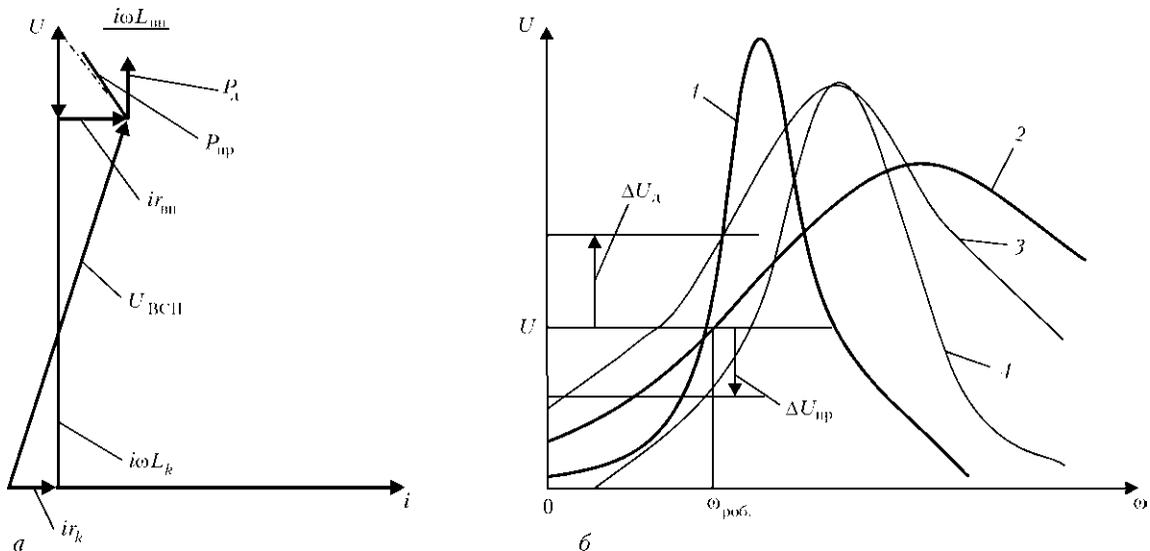


Рис. 3. Роздільний вплив дефекту контрольованого матеріалу (алюміній) та зазору між ВСП і об'єктом контролю: а — векторна діаграма струмів і напруг на елементах ВСП; б — амплітудно-частотні характеристики чотирьохполосників на основі резонансних контурів ВСП і ДКІ

Однчасна присутність дефекту і збільшеного зазору у зоні дії електромагнітного поля ВСП не виключає індикацію дефекту. Безумовно її чутливість зменшується у залежності від величини зазору. Як показали експериментальні дослідження, що виконувалися з перетворювачами (див. рис. 1) на частоті струму у котушці 1...2 МГц, дефекти у вигляді тріщин з глибиною до 0,2 мм та довжиною до 1 мм однозначно фіксуються навіть при існуванні зазору до 0,5 мм.

Підвищення чутливості вихрострумowego дефектоскопу виконуємо за допомогою диференційного підсилювача ДП (див. рис. 2). Попередньо напруги контурів з ВСП і допоміжною котушкою випрямляємо детекторами  $D_1$ ,  $D_2$  з фільтрами нижніх частот  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  на їх виходах. Для виключення шунтування резонансних контурів на їх виходах встановлені повторювачі  $P_1$ ,  $P_2$  на польових транзисторах.

Вихідний сигнал диференційного підсилювача подається на індикатор, який в залежності від знаку напруги фіксує наявність дефекту матеріалу або зростання зазору. Для визначення величини дефекту чи зазору вказана напруга вимірюється, перетворюється у цифровий код за допомогою АЦП та реєструється на цифровому табло ЦТ.

## Висновки

Розроблена схема вихрострумowego дефектоскопу з використанням двох однакових резонансних контурів — одного на основі котушки індуктивності вимірювального ВСП, а іншого на основі допоміжної котушки індуктивності, відрізняється простою настроювання частоти задаючого генератора та роздільною індикацією за знаком вихідної напруги як поверхневого дефекту матеріалу об'єкта контролю, так і зазору між поверхнею цього матеріалу та вимірювальним перетворювачем. Висока чутливість дефектоскопу до поверхневих дефектів має місце завдяки ви-

користанню напівзамкнутого феритового магнітопроводу, що концентрує електромагнітний потік котушки вихрострумowego вимірювального перетворювача для збудження в об'єкті контролю вихрових струмів в зоні обмежених розмірів.

Конструкція феритового осердя ВСП розроблена з певним видовженням центрального стрижня, що дозволило виключити залежність результатів контролю від нахилу вісі котушки перетворювача в межах  $\pm 30^\circ$  відносно нормалі до поверхні об'єкта контролю.

*Приведены результаты разработки вихретокового высокочастотного (1 МГц) преобразователя и дефектоскопа на его основе, позволяющего раздельно в соответствии со знаком отклонения выходного напряжения контролировать наличие поверхностных трещин и зазора (толщины краски). Для раздельного контроля кроме катушки вихретокового преобразователя использована дополнительная аналогичная индуктивность, которая, как и вихретоковый преобразователь, включена в состав параллельного резонансного контура.*

*Частота задающего генератора выбирается из условия равенства напряжений на резонансных контурах при установке вихретокового преобразователя в рабочее положение на поверхности бездефектного участка объекта контроля. В этом случае наличие дефекта или изменению зазора будет соответствовать различный знак отклонения разностного напряжения на резонансных контурах.*

*Катушка измерительного вихретокового преобразователя помещена в ферритовый полуброневого сердечник со специально удлиненным центральным стержнем, что обеспечивает независимость результатов контроля от углового ( $\pm 30^\circ$ ) положения преобразователя при выполнении контроля.*

1. Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В. Электромагнитный контроль / Под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1992.—380 с.
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Ч. 1. — М.: Изд-во, 1967.— 320 с.

Надійшла до редакції  
10.02.2012

## НОВА КНИГА



**М.О. Карнаш, І.В. Рибіцький, Т.Т. Котурбаш, О.Г. Бондаренко, О.М. Карнаш.**

Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі. Монографія. — Видавництво: ІФНТУНГ, 2012. — 420 с.

Книга присвячена вирішенню важливого науково-технічного завдання — удосконалення методів і засобів акустичного контролю об'єктів підвищеної небезпеки, якими є бурове та нафтогазове устаткування, безпосередньо в умовах експлуатації. У монографії наведено результати науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт зі створення нових способів і засобів контролю фактичного технічного стану бурового, нафтогазопромислового устаткування й інструменту, нафто-, газо-, продуктопроводів та інженерних мереж. Авторами роботи успішно вирішена важлива науково-технічна проблема нафтогазової галузі — суттєве зменшення аварій та відмов нафтогазового устаткування й інструменту шляхом розроблення, впровадження нових методів і засобів виявлення на ранній стадії розвитку різних дефектів експлуатаційного походження методами неруйнівного контролю, у першу чергу акустичного.

Призначена для науковців — фахівців у галузі технічної діагностики і контролю конструкцій та устаткування, аспірантів, магістрів, студентів технічних спеціальностей.



УДК 621.14.32

# ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА БАРКГАУЗЕНА

С. ЛАССЕ (Компания Stresstech Oy, Финляндия)

*Показано, что по сравнению с другими технологиями автоматическая система контроля, основанная на анализе шумов Баркгаузена, обеспечивает наиболее эффективное отслеживание дефектов, вызванных шлифованием, а также является простой в использовании.*

*It is shown that compared to other processes and technologies, automatic system of Barkhausen Noise (BN) monitoring ensures the most efficient detection of defects due to grinding, as well as being easy-to-operate equipment.*

В процессе шлифования деталей из закаленной стали всегда существует вероятность повреждения стали, заключающаяся в возникновении остаточных напряжений или изменений в микроструктуре. Методам обнаружения дефектов подобного рода присущи такие недостатки, как высокая стоимость, длительность, сложность, субъективность либо использование опасных реагентов. Относительно новый метод, известный как анализ шумов Баркгаузена (ШБ), удовлетворяет всем требованиям при выявлении дефектов шлифованной стали и является надежным, нормированным и экономичным. Данная технология проста в применении и помогает практически полностью исключить выпуск бракованной продукции. Анализаторы ШБ используются на производстве как в ручных, так и в полностью автоматических системах контроля. В сочетании с проверкой размеров, испытанием на твердость и периодическим металлографическим анализом метод анализа ШБ обеспечивает полный контроль качества продукции. Анализ ШБ может быть сильным звеном в цепи, ведущей к длительной и надежной работе ответственных узлов и таких деталей, как зубчатые колеса, распределительные и коленчатые валы, подшипники и т. д.

**Техника измерения и оборудование.** В основе анализа ШБ лежит относительно простая технология, заключающаяся в особенностях поведения ферромагнитных материалов в магнитном поле.

При помещении ферромагнетика в магнитное поле происходит изменение результирующей намагниченности, которое является результатом микроскопических движений стенок магнитных доменов внутри материала. При движении доменных стенок возникает электрический импульс, регистрируемый катушкой индуктивности, расположенной рядом с материалом. Данные дискретные импульсы измеряют суммарно, что приводит к компиляции нескольких тысяч электрических импульсов, называемых ШБ [1–5]. Амплитуду данного сигнала иногда называют магнитоупругим параметром (МП). На амплитуду влияют любые явления, препятствующие движению доменных стенок. Это могут быть инородные включения, осадки, дислокации, границы зерен, а также остаточные напряжения. В отношении макрометаллургии данные факторы можно условно разделить на две категории: относящиеся к твердости и к остаточному напряжению. В общем случае ШБ возрастают при уменьшении твердости и увеличении напряжения растяжения, и, напротив, снижаются при увеличении твердости и увеличении напряжения сжатия. Этот принцип проиллюстрирован на рис. 1 и 2.

Принцип работы оборудования, предназначенного для регистрации ШБ, показан на рис. 3. С помощью электромагнита создается магнитное поле, в которое помещается ферромагнитный ма-

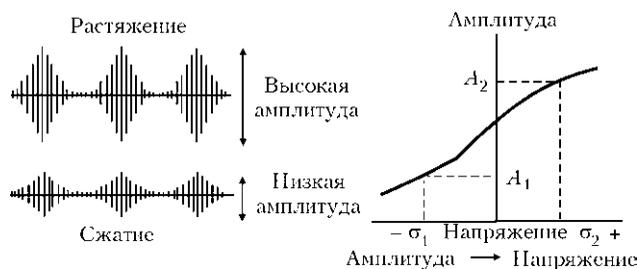


Рис. 1. Влияние напряжений на уровень ШБ

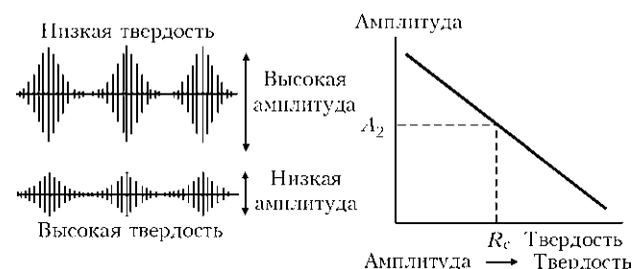


Рис. 2. Влияние твердости на уровень ШБ

© С. Лассе, 2012

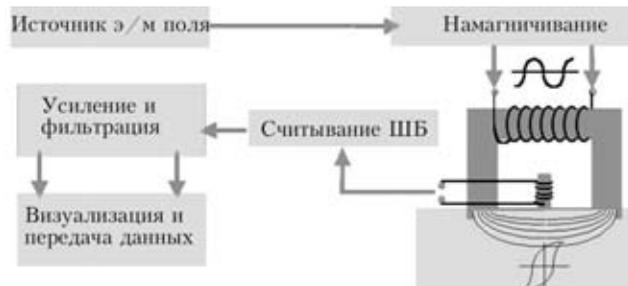


Рис. 3. Принцип работы оборудования для регистрации ШБ

териал. Данный материал реагирует на появление магнитного поля, как описано выше, испусканием пачки импульсов, регистрируемых детектором — катушкой индуктивности. Далее сигнал усиливается и фильтруется. Амплитуда рассчитывается с помощью метода наименьших квадратов, результаты переводятся в цифровую форму для отображения на компьютере.

**Природа дефектов материалов, вызванных шлифованием.** Повреждения при шлифовании представляют собой результат превращения тепловой энергии в теплоту, которая концентрируется в поверхностных слоях и может вызвать нежелательные эффекты. Факторами, вызывающими увеличение температуры в поверхностном слое, являются тип смазочно-охлаждающей жидкости, ее концентрация, срок службы, расход, тип шлифовального диска, его скорость, степень износа, скорость подачи и обработка материала перед шлифованием, т. е. способ термообработки [4]. Предполагают, что повреждение может начаться при частичной релаксации напряжения сжатия при температурах ниже 500 °С. При повышении температуры до 600 °С возникают прижоги класса В, также называемые прижогом с повторным отпуском. Результатом будет являться перегрев, приводящий к снижению твердости поверхности и возникновению напряжений растяжения. Дальнейшее повышение температуры до 720 °С приведет к возникновению прижогов D-класса, называемых подкаливанием. Данный дефект охватывает области очень твердого и хрупкого материала, а также области, окружающие прижог класса В, «мягкий» материал. Остаточные напряжения также будут сложными вследствие изменения уровня повреждения по всей поверхности. В некоторых областях будут наблюдаться сжимающие напряжения, в то время как другие будут чрезвычайно эластичными [4, 6].

Существующие методики обнаружения описанных выше повреждений включают визуальное обследование путем химического травления [7], исследование микротвердости, распределения остаточного напряжения рентгеновской дифракцией и анализом ШБ. Каждый из описанных выше дефектов можно детектировать с помощью анализа ШБ. Рентгеновская дифракция также может при-

меняться в каждом случае, однако этот метод является длительным, дорогостоящим и может быть разрушающим. Травлением растворами и исследованием на микротвердость можно выявить только прижоги В и D класса. Кроме того, исследование твердости является разрушающим способом, а травление — субъективным [4, 6].

Из рис. 1 и 2 видно, что сигнал ШБ возрастает при снижении прочности и напряжения растяжения. Это точный сценарий шлифовального прижога с повторным отпуском (рис. 4). Поскольку повреждения при шлифовании влияют на твердость и напряжение и, следовательно, приводят к увеличению сигнала ШБ, выявить прижоги шлифования анализом ШБ просто: если амплитуда возросла — присутствует прижог. Исключением из этого правила будут зоны повторно закаленные. В этом случае амплитуда сигнала может снижаться, однако, данные зоны всегда окружены чрезвычайно пластичными зонами (зонами отпуска), в области которых происходит сильное увеличение амплитуды ШБ (магнитоупругого параметра).

**Обзор оборудования и операционной системы.** Обычная система контроля (рис. 5) состоит из устройства, передвигающего датчик, вращающегося центра, трехкулачкового патрона с программируемым вращением, анализатора ШБ, компьютера, а также системы сбора данных и программного обеспечения для анализа. Параметры вращения и перемещения датчика программируются компьютером, например, для каждого от-

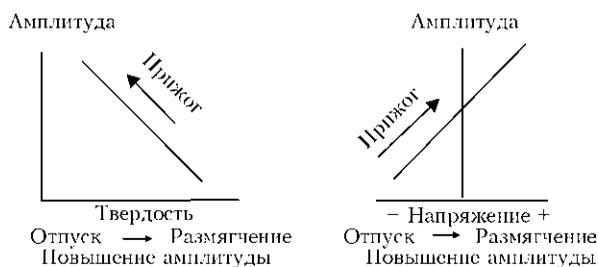


Рис. 4. Влияние шлифовальных прижогов на сигнал ШБ



Рис. 5. Автоматизированная система контроля зубчатых колес



дельного типа зубчатого колеса. Оператор устанавливает зубчатое колесо вручную, выбирает тип колеса из списка в программном обеспечении и запускает процесс. Все остальные операции выполняются автоматически. Датчик перемещается в точку расположения зуба колеса (рис. 6, 7), затем сканирует согласно запрограммированному положению вдоль оси зуба, вплоть до четырех радиальных положений на каждый зуб. Затем зубчатое колесо немного поворачивается, позволяя датчику переместиться к противоположной стороне зуба. Далее датчик отодвигается от зубчатого колеса, и оно снова поворачивается, позволяя датчику переместиться для исследования к следующему зубу. Описанная последовательность операций выполняется для введенного количества зубьев и результаты сканирования выводятся на монитор компьютера, также отображается статус — ПРИ-

НЯТО или ОТБРАКОВАНО (статус вычисляется исходя из запрограммированных условий отбраковки). Систему можно настроить на измерение одного или всех зубьев, также можно задать измерение одного зуба, затем пропустить пятый, измерить шестой и т. д. Как правило, стандартно системе задают выполнение двух сканов на каждую сторону и общее измерение четырех зубьев, расположенных примерно под углом 90°. Данная методика существенно сокращает время измерения по сравнению с измерением каждого зуба без снижения надежности. По завершении измерения результаты будут сохранены в файл или выведены на печать.

**Основы анализа ШБ.** Прежде чем приступить к анализу ШБ, необходимо установить корреляцию между сигналом ШБ и некоторой иной величиной, являющейся мерой серьезности (сложности) повреждения с помощью, например, химического травления. Исходя из выявленной зависимости, для анализатора ШБ можно установить критерий для отбраковки. Один простой метод контроля основан на том факте, что величина МП связана с результатами визуального изучения результатов химического травления. Выполняя множественные измерения деталей и сравнивая с результатами химического травления, можно выявить корреляцию, а также оценить степень прижога, используя магнитуду ШБ либо МП. Изучая зависимость, устанавливают критерии отбраковки, которые вводятся в программу для данного конкретного типа зубчатого колеса. После введения критерия отбраковки можно выполнять анализ ШБ производственных образцов.

Пример настроек, используемых для одного типа зубчатого колеса мотоциклетной коробки передач, приведен на рис. 8. Показана зависимость между МП и визуальным наличием прижога, определенного химическим травлением. На рис. 8, а представлена зависимость для величин Max МП, измеренных во всех сканах колеса, а на рис. 8, б — зависимость для разницы между Max и Min МП, измеренная во всех сканах детали. На каждом графике пересечение линий показывает критерий отбраковки. В каждом случае нижний левый квадрант означает принятые образцы, верхний правый

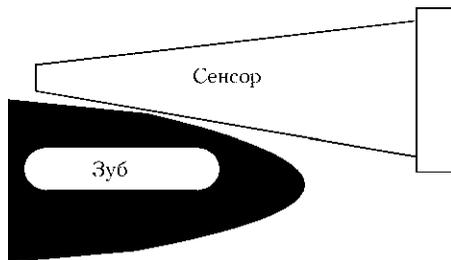


Рис. 6. Контакт сенсора с зубом зубчатой передачи



Рис. 7. Процесс контроля винтового зубчатого колеса

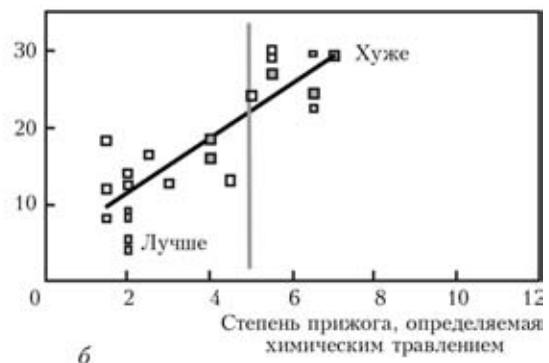
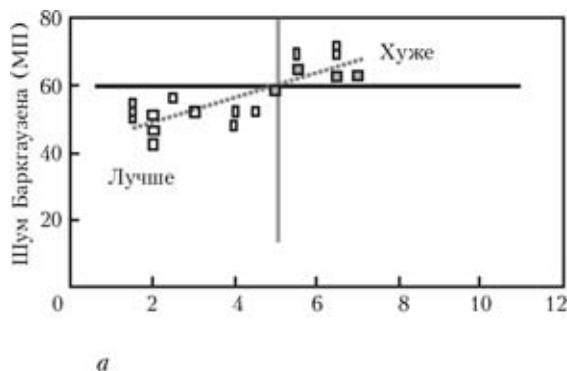


Рис. 8. Зависимость max (а) и Max-Min МП (б) от степени прижога, определенной методом травления



— отбракованные. Поэтому, устанавливая максимум предела отбраковки 60 МП и разницу пределов отбраковки 20 МП, все детали, отбракованные в результате химического травления, будут также отбракованы анализом ШБ. Показанный пример иллюстрирует лишь небольшой разброс данных, относящихся к относительно небольшой группе деталей. Анализируя данный пример, видим, что следует выбирать критерий отбраковки немного меньше обозначенного. Это будет несколько заниженное значение, однако пользователь будет уверен, что ни одна бракованная деталь не была пропущена. Для увеличения достоверности результатов следует выявить окончательную корреляцию на основе результатов для 60 групп образцов, полученных тремя различными пользователями. Такой способ увеличит надежность критерия отбраковки и предела, необходимого для дальнейшего анализа детали. Если результаты для данной части детали близки или выше критерия отбраковки, то обычной практикой является дополнительная проверка химическим травлением. Этот анализ является средством для повышения уровня надежности, особенно если критерий отбраковки был установлен с использованием небольшой группы деталей, тем не менее операторы в течение длительного времени будут уверены, что система анализа и заданный критерий отбраковки достоверны.

**Преимущества системы автоматического контроля ШБ.** Раннее обнаружение повреждений. Повреждения при шлифовании возникают в результате износа шлифовального диска, однако, также могут быть следствием неправильной скорости подачи, скорости вращения шлифовального диска либо других многочисленных критериев, упомянутых выше. Учитывая огромные ежедневные объемы производства, важно быстро обнаружить ошибку. Способ химического травления занимает несколько минут, кроме того, установка не всегда расположена близко к шлифовальному станку. Поэтому травление, как правило, выполняют один раз в час или реже, и, очевидно, обнаружение ошибок происходит не быстро. Подобная ситуация может привести к огромным потерям времени и денег в связи с производством бракованной продукции. Система контроля ШБ позволяет выявлять дефекты в течение нескольких минут, что позволяет сохранить тысячи долларов. Некоторые пользователи отмечают окупаемость вложения в течение всего трех месяцев.

**Регистрация результатов.** Амплитуда ШБ регистрируется для каждой отдельной детали, данные сохраняются. Травление не позволяет выполнять регистрацию результатов, за исключением ведения регистрационного журнала оператором, вследствие чего вероятность возникновения человеческой ошибки увеличивается.

**Контрольная карта характеристик качества.** При необходимости результаты можно использовать для выполнения статистического анализа.

**Снижение случаев претензий по гарантии.** Благодаря высокой надежности определения прижогов, анализ ШБ позволяет полностью исключить или существенно снизить претензии по гарантии. Не прибегая к травлению и используя тщательный анализ ШБ, можно существенно снизить или полностью исключить выпуск бракованной продукции.

**Отсутствие расходных материалов, низкие эксплуатационные затраты.** При анализе ШБ не используются химические реагенты или другие расходные материалы, в то время как кислотное травление требует тщательного контроля, кроме того, необходимо учитывать современные высокие требования по защите окружающей среды.

**Настройка процесса шлифования с помощью автоматизированной системы контроля ШБ.** В случае применения для контроля зубчатого колеса коробки передач, как правило, используется одна и та же шлифовальная установка для разных типов колес. Для производства сотен различных типов одинаковых деталей используется одна и та же установка, поэтому важно выполнять быструю настройку шлифовального станка и смену типа детали.

Как отмечалось, химическое травление занимает несколько минут, кроме того, оборудование для травления может находиться на расстоянии сотен метров от шлифовального станка. Оператору необходимо настроить шлифовальный станок для конкретного номера детали и выполнить тестовое измерение образца. Далее деталь подвергают травлению и, исходя из полученных результатов, вносят изменения в настройки шлифовального станка. Этот процесс повторяется до тех пор, пока оператор не получит удовлетворительных результатов травления. Перечисленная последовательность операций может продолжаться от нескольких минут до часа или дольше в зависимости от опыта оператора. Настройка шлифовального станка с использованием анализа ШБ основана на том же принципе, однако, оборудование, как правило, расположено в непосредственном доступе от шлифовального станка и загрузка детали происходит незамедлительно. Внесение изменений в настройки шлифовального станка занимает минуту или две во время шлифования тестового образца и общее время повторяющегося процесса настройки заметно снижается. Кроме того, данные представлены в количественном виде, что позволяет оператору сделать некоторые предварительные выводы о необходимых изменениях не основываясь на догадках, а исходя из результатов травления. Видно, что использование анализа ШБ позволяет существенно упростить настройку шлифо-



вального процесса и сэкономить время и средства.

**Мониторинг процесса шлифования с использованием автоматической системы контроля ШБ.** После первоначальной наладки шлифовального станка целесообразно периодически отслеживать процесс путем тестирования образцов производства через определенные интервалы времени либо выполнять 100%-й контроль. Такой анализ легко и быстро выполнять с помощью автоматической системы контроля ШБ. Подобная проверка необходимого количества деталей, используется для гарантирования качества деталей, а также предварительного поиска возможных проблем, таких как износ круга до того, как это станет приносить существенный материальный ущерб.

Обычная система анализа ШБ может являться отдельным инструментом для мониторинга операций финишного шлифования во время производства, независимо от объемов выпуска — двух в час или 200. Это быстрая, простая и неразрушающая методика определения правильности работы шлифовального станка.

**Интерпретация результатов.** Интерпретация результатов, полученных системой анализа, основана на основной теории ШБ и некоторых определяющих параметрах, оказывающих влияние на сигнал.

Во-первых, нами доказано, что ШБ возрастают при уменьшении твердости и уменьшении напряжения сжатия. В целом, ШБ возрастает в зависимости от количества повреждений, возникших в процессе шлифования. На рис. 9 показаны выходные данные специального программного обеспечения ViewScan. Он представляет измерения, выполненные для каждой боковой поверхности зуба с настройкой 1 скан в общем для 14 зубцов. Представленные данные скана получены для одной боковой поверхности зуба от одного конца до другого. Каждая боковая поверхность зуба представ-

лена отдельным графиком. На графике также показан максимальный предел отбраковки, который в данном случае составляет 35. Все зависимости, расположенные выше 35, отображаются линией красного цвета. На экране также отображаются другие параметры, полученные из скана, такие как Мин (Min), Среднее (Avg) и Макс/Средн. (Max/Avg). Эти параметры также характеризуются своими собственными пределами отбраковки и являются выбираемыми. Далее, возвращаясь к типу повреждений и основываясь на графиках, для данного зубчатого колеса очевидно, что более высокие значения МП являются индикацией прижога. В целом, если наблюдается точное отклонение от обычного графика, то это указывает на наличие прижога или другого дефекта, например, мягкого участка.

Во-вторых, исходя из результатов измерений, приведенных на рис. 9 — данные, полученные от стороны к стороне и от зубца к зубцу, очень схожие. Это свидетельствует о том, что сигнал ШБ не меняется при переходе к следующему зубцу или противоположной грани. Данное заключение является очень важным при определении причины возникновения повреждения. Например, если изменение сигнала происходит от одной грани до другой, и в результате отбраковывается одна грань из двух, то это свидетельствует о плохом центрировании шлифовального круга между зубцами значит — с одного зубца было снято больше материала. Подобные выводы и анализ полученных результатов являются очень ценным инструментом, помогающим сэкономить время и исключить возникновение неисправностей.

Следующий вывод, который можно сделать во время измерения — увеличение общего уровня сигнала для данной детали, при этом разница между максимальными и минимальными величинами остается небольшой, однако уровень может возрасти от нормального 40...50 до 70...80. Подобное изменение уровня сигнала может не являться результатом наличия дефекта шлифования. Например, подобные изменения могут возникнуть в результате предварительной обработки. Можно изменить некоторые параметры, однако наиболее часто изменяют режим тепловой обработки, влияющей на твердость либо на количество остаточного аустенита — сигнал ШБ, полученный после шлифования, будет иным. Если подобный тип изменений часто наблюдается, то разница между максимальным и минимальным критериями отбраковки становится лучшим инструментом обнаружения повреждений шлифования, однако, при использовании максимального критерия отбраковки подобные разновидности изменений будут отмечены. Использование подобного способа отбраковки предпочтительнее, поскольку позволяет отслеживать другие потенциально опасные изменения в процессе обработки.

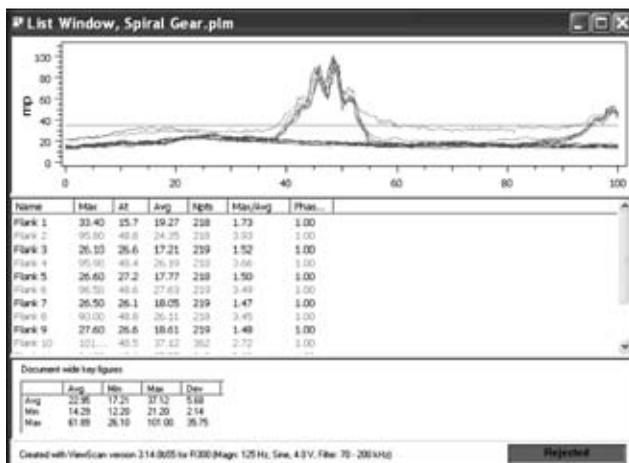


Рис. 9. Пример выходных данных специального программного обеспечения ViewScan8



При выявлении потенциальной проблемы технолог, проанализировав графики, исправит вероятную причину. Например, при тестировании зубчатого колеса получили высокие значения. Оператор информирует технолога, который направляет зубчатое колесо на дополнительный анализ травлением. На колесе травлением не выявлено видимых признаков прижога. Технолог, исходя из графиков, находит максимальные величины, превышающие критерий отбраковки, однако условия отбраковки Мах-Мин находятся в допустимых пределах. Далее технолог решает выполнить тест на твердость. Тест на твердость указывает на значение твердости чуть ниже обычного. Это может быть причиной увеличения сигнала. Технолог принимает решение проверить уровень остаточного аустенита и разрезать образец для определения глубины твердого слоя. Результаты показывают на пониженный уровень остаточного аустенита по сравнению с нормальным и глубину твердого слоя, близкую к нормальной. Технолог заключает, что зубчатое колесо может проходить контроль качества, однако следует проверить печь и контролировать уровень остаточного аустенита.

Система анализа ШБ может предоставить гораздо больше возможностей, а не быть просто системой выявления прижогов.

**Другие успешные применения системы анализа ШБ.** Анализ ШБ успешно применяется во многих областях, среди которых контроль шлифования является наиболее широко распространенным. Другие применения включают выявление дефектов токарной обработки закаленных деталей и тепловой обработки, измерение эффективности дробеструйной очистки, измерение остаточных напряжений, а также оценку долговечности подшипников. Также можно отметить выявление дефектов шлифования кулачков кулачковых валов, шеек коленчатых валов, реечношестеренчатых подъемников, подшипников, зубчатых колес самолетных шасси (даже через хромированный слой), повышение долговечности подшипников, оценку эффективности дробеструйной очистки сварных швов, а также оценку влияния правки на распределительные и коленчатые валы.

## Выводы

Анализ ШБ представляет собой надежный инструмент для выявления повреждений шлифованных стальных деталей. Рассмотрены основные принципы измерения и применения для контроля различных деталей, доказывающие возможность

использования не только для выявления повреждений шлифования, но также в качестве инструмента поиска дефектов в процессе контроля качества. Анализ ШБ является гораздо более быстрым по сравнению с существующим методом химического травления, а также характеризуется превосходной чувствительностью и достоверностью результатов. Техника выполнения измерения и программное обеспечение просты и понятны пользователю. Система помогает сохранить время и финансы во время настройки и мониторинга, а также при выявлении дефектов. При полном внедрении системы анализа ШБ травление используется лишь в редких случаях в металлургической лаборатории. Показано, что по сравнению с другими способами и технологиями, автоматическая система контроля ШБ обеспечивает наиболее эффективное отслеживание дефектов, вызванных шлифованием, а также является простым в использовании оборудованием, которое может окупиться всего за три месяца.

1. *Fix Robert M.* Applications of Barkhausen Noise Analysis (BNA), a Review of Three Cases Having Industrial Significance // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998. — Hanover, Germany.
1. *Karpuschewski B.* Introduction to Micromagnetic Techniques // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998, Hanover, Germany.
2. *Seppi Fred.* Findings of Barkhausen Noise Tests to Detect Grinding Burns and Residual stress in High Strength Steel // Headquarters Ogden Air Logistics Center (AFLC), Hill Air Force Base, 01 Oct. 1986.
3. *Shaw B. A., Hyde T. R., Evans J. T.* Detection of Grinding Damage in Hardened Gear Steels Using Barkhausen Noise Analysis // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998, Hanover, Germany.
4. *Detection of Thermal Damage in Steel Components After Grinding Using the Magnetic Barkhausen Noise Method / A. S. Wojtas, L. Suominen, B. A. Shaw, J. T. Evans* // First Intern. conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Sept. 1-2, 1998, Hanover, Germany.
5. *Pro Richard J.* Grinding Burn Detection During Production Using Magnetic Barkhausen Noise Measurements // Materials Evaluation. — 2006. — 45, № 6. — P. 610–612.
5. *Ceurter J. S., Smith C., Ott R.* The Barkhausen Noise Inspection Method for Detecting Grinding Damage in gears // Advanced Materials & Processes, Apr. 2002
6. *Griffiths C. A.* Closing the Loop on Product Integrity on Bearings with Engineering Source Approval // Published by Split Ballbearing, Division of MPB Corp., July, 1989.
7. *ANSI/AGMA 2007-B92.* Surface Temper Etch Inspection After Grinding, February, 1992.
8. *Suominen L., Tiitto K., Ehrman R.* Effects of Retained Austenite on the Evaluation of Grinding Damage by Barkhausen Noise in Carburized steels // Thirteenth Annual conf. on Properties and Applications of Magnetic Materials, May 17–19, 1994.

Поступила в редакцию  
02.03.2012



## ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЄСТРАЦІЇ СВІТЛОВИХ СИГНАЛІВ

Є. П. ПОЧАПСЬКИЙ, канд. техн. наук (Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України)

*Проаналізовані алгоритми оцінювання параметрів світлового сигналу з заданою відносною середньоквадратичною похибкою в умовах нестабільності потужності виходу джерела збуджувального випромінювання та наявності фонових завад оптичного каналу передачі. Розглянуті питання достовірності оптичних методів контролю, зокрема отримані аналітичні вирази для довірчої ймовірності та довірчого інтервалу одержуваних оцінок інтенсивності світлового сигналу, відношення та різниці інтенсивностей. Розкрито питання ймовірності одержання хибних результатів вимірювань різниці інтенсивностей в умовах суттєвих фонових завад.*

*Algorithms for assessment of light signal parameters with preset relative mean-root-square error under the conditions of instability of output power of excitation radiation source and presence of background interference of optical transmission channel were analyzed. Issues of validity of optical testing methods are considered, in particular analytical expressions were derived for confidence probability and confidence interval of derived estimates of light signal intensity, ratio and difference of intensities. The problem of probability of obtaining erroneous results of measurement of intensity difference under the conditions of considerable background interference is described.*

**Актуальність та стан проблеми.** Оптичний контроль використовують для визначення змін структури і фізико-хімічних властивостей матеріалів, виявлення неоднорідностей та оцінки напружено-деформованого стану елементів конструкцій, вимірювання розмірів, геометричних форм виробів тощо [1]. Він ґрунтується на аналізі взаємодії за різноманітними ефектами оптичного випромінювання з об'єктом контролю (ОК) [2].

Результуючий випадковий світловий сигнал  $e(t)$ , у статистичних характеристиках якого закладені відомості про параметри контрольованого об'єкта, реєструють фотоелектричним перетворювачем. На виході перетворювача одержуємо потік коротких імпульсів струму. Якщо ефект взаємодії зондувального випромінювання з ОК слабкий (має незначний переріз взаємодії), то ймовірність перекриття імпульсів вихідного сигналу фотоелектричного перетворювача практично нульова, що дозволяє розглядати його як випадковий імпульсний потік

$$X(t) = \sum_i h_i \sigma(t - t_i), \text{ де } h_i \text{ — значення амплітуди } i\text{-го}$$

імпульсу, а функція  $\sigma(t - t_i) = 1$ , якщо  $t = t_i$  і  $\sigma(t - t_i) = 0$ , коли  $t \neq t_i$  [2, 3]. Інтервали  $\vartheta_i = t_i - t_{i-1}$  між моментами появи суміжних імпульсів розподілені за експоненційним законом. Інформативними параметрами сигналу є його інтенсивність та параметри автоковаріаційної функції  $K_{N(T)}(\tau) = [N(T, t) N(T, t + \tau)]$ , де  $N(T)$  — кількість імпульсів, нагромаджених в момент  $t$  за час спостереження  $T$ , яка розподілена за законом Пуассона.

Інформативні параметри сигналу  $X(t)$  пов'язані певним чином з параметрами контрольованого об'єкта. Зокрема для широкого кола ефектів взаємодії зондувального випроміню-

вання з ОК маємо лінійний зв'язок інтенсивності  $n$  сигналу з контрольованими параметрами.

Для забезпечення необхідної заданої достовірності контролю (ймовірності відповідності результатів контролю дійсним значенням контрольованих параметрів) потрібно проводити оцінку відповідного параметра контрольованого об'єкта, пов'язаного деяким чином з інформаційним параметром оптичного сигналу, з необхідною наперед заданою відносною середньоквадратичною похибкою з наступним обчисленням довірчої ймовірності та довірчого інтервалу одержаної оцінки параметрів.

У літературі [3, 4] відомі алгоритми лінійного нагромадження, які полягають у нагромадженні протягом часу  $T$  імпульсів потоку  $X_1(t)$ . У цьому випадку оцінка інтенсивності дорівнює  $\hat{n} = N/T$ , де  $N$  — кількість імпульсів, нагромаджених за час  $T$ , яка приймає випадкові значення та описується пуассонівським законом розподілу. Математичне сподівання оцінки інтенсивності дорівнює  $[\hat{n}] = n$ , а її дисперсія —  $D_{\hat{n}} = n/T$ ; відносна середньоквадратична похибка  $\delta_{\hat{n}} = 1/\sqrt{nT}$ .

З виразу для відносної середньоквадратичної похибки видно, що апіорі невідомо який треба вибрати час нагромадження  $T$ , щоб забезпечити оцінку інтенсивності з постійною наперед заданою величиною відносної середньоквадратичної похибки  $\delta_3$ , а тобто невідомо і достовірність оцінок параметрів за оптичного контролю.

Метою нашого дослідження є аналіз алгоритмів оцінок параметрів світлового сигналу з заданою середньоквадратичною похибкою та обчислення довірчих ймовірностей та довірчих інтервалів одержаних оцінок.

**Достовірність оцінки інтенсивності світлового сигналу.** Нехай у результаті експерименту зареєстровано  $N$  значень інтервалу  $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N$  між



суміжними імпульсами потоку  $X(t)$ . Для випадку, коли значення добутку інтенсивності вихідного імпульсного потоку фотоелектричного перетворювача на величину інтервалу кореляції зареєстрованого світлового сигналу близьке до нуля, то закон розподілу інтервалів є експоненційним і методом максимуму правдоподібності для оцінки інтенсивності потоку одержується вираз [3]

$$\hat{n} = N / \sum_{i=1}^N \vartheta_i \quad (1)$$

Математичне сподівання оцінки (1):

$$[\hat{n}] = nN / (N - 1),$$

дисперсія:

$$D_{\hat{n}} = n^2 N^2 / [(N - 1)^2 (N - 2)],$$

відносна середньоквадратична похибка:

$$\delta_{\hat{n}} = 1 / \sqrt{(N - 2)} \approx 1 / \sqrt{N}.$$

Тобто, використовуючи максимально правдоподібну оцінку (1), нам апіорі відомо, що якщо ми хочемо оцінити параметр  $n$  з заданою відносною середньоквадратичною похибкою  $\delta_3 = \delta n = \text{const}$ , то для цього необхідно зареєструвати кількість значень інтервалу, що дорівнює  $N = \delta_3^{-2}$ .

Довірчий інтервал параметра  $n$  означається як випадковий інтервал, який повністю визначають результатами експерименту, не залежить від невідомих характеристик і який із заданою імовірністю  $\alpha_1$  покриває невідому статистичну характеристику  $n$ .

Для визначення довірчого інтервалу для параметра  $n$  використаний метод, який ґрунтується на знаходженні густини розподілу відношення оцінки параметра до самого параметра [5, 6]. Можна показати, що густина розподілу відношення  $(\hat{n}/n) = x$  буде:

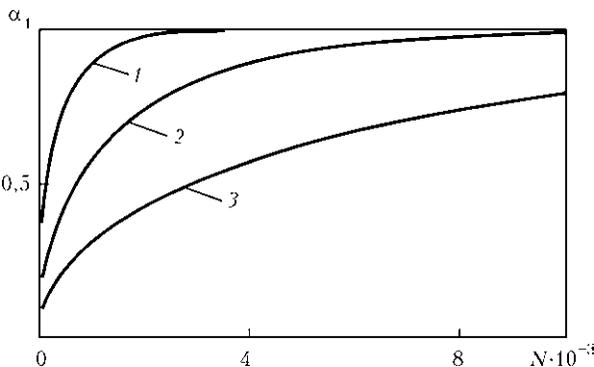


Рис. 1. Залежність коефіцієнта довіри  $\alpha_1$  від числа зареєстрованих інтервалів  $N$  для різних значень  $\epsilon_{\alpha_1}$ : 1 — 0,05; 2 — 0,025; 3 — 0,0125

$$p(x) = \frac{N (N \frac{1}{x})^{N-1}}{x^2 (N-1)!} \exp(-N \frac{1}{x}).$$

Довірчий інтервал для додатного параметра  $n$  означається виразом:

$$\max \{0, (1 - \epsilon_{\alpha_1}) \hat{n}\} < n < (1 + \epsilon_{\alpha_1}) \hat{n}.$$

При  $\epsilon_{\alpha_1} \in [0, 1]$  цей інтервал симетричний відносно  $\hat{n}$ , а для  $\epsilon_{\alpha_1} > 1$  симетрія не досягається. Наведені вище нерівності виконуються тоді і тільки тоді, коли

$$1 / (1 + \epsilon_{\alpha_1}) < \hat{n} / n < 1 / \max \{0, 1 - \epsilon_{\alpha_1}\}.$$

Вони визначають довірчий інтервал для  $n$ , який відповідає коефіцієнту довіри  $\alpha_1$ , якщо  $\epsilon_{\alpha_1}$  задовільняє рівнянню:

$$P(1 / (1 + \epsilon_{\alpha_1}) < \hat{n} / n < 1 / \max \{0, 1 - \epsilon_{\alpha_1}\}) = \alpha_1.$$

Це рівняння еквівалентне співвідношенню:

$$\alpha_1 = \int_{1 / (1 + \epsilon_{\alpha_1})}^{1 / \max \{0, 1 - \epsilon_{\alpha_1}\}} \frac{N (N \frac{1}{x})^{N-1}}{x^2 (N-1)!} \exp(-\frac{N}{x}) dx.$$

Проінтегрувавши, одержимо вираз для  $\alpha_1$  через неповну гамма-функцію  $\gamma(\alpha, \beta)$ :

$$\alpha_1 = \frac{1}{(N-1)!} [\gamma(N, N(1 + \epsilon_{\alpha_1})) - \gamma(N, N \max \{0, 1 - \epsilon_{\alpha_1}\})]. \quad (2)$$

На рис. 1 наведені криві залежності коефіцієнта довіри  $\alpha_1$  від числа  $N$  зареєстрованих інтервалів  $\vartheta$  для різних значень довірчого інтервалу, який визначається  $\epsilon_{\alpha_1}$ . Бачимо, що при заданому  $\epsilon_{\alpha_1}$ , коефіцієнт довіри тим більший, чим більше  $N$ .

Розглянемо також імовірність попадання інтервалів  $n$  в інтервал

$$\hat{n} - \sigma_{\hat{n}} < n < \hat{n} + \sigma_{\hat{n}}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{\hat{n}}$  — середньоквадратичне відхилення оцінки інтенсивності (1), яке дорівнює  $\sigma_{\hat{n}} \approx \hat{n} / \sqrt{N}$ .

Тоді вираз (3) можна записати у вигляді  $\hat{n}(1 - 1/\sqrt{N}) < n < \hat{n}(1 + 1/\sqrt{N})$ , звідки  $\epsilon_{\alpha_1} \approx 1/\sqrt{N}$ .

У результаті для коефіцієнта довіри одержимо:

$$\alpha_1 = \frac{1}{(N-1)!} [\gamma(N, N(1 + \frac{1}{\sqrt{N}})) - \gamma(N, N(1 - \frac{1}{\sqrt{N}}))].$$

На рис. 2 наведено графік залежності коефіцієнта довіри  $\alpha_1$  від  $N$  — кількості зареєстрованих інтервалів.

Бачимо, що при досить великому  $N$   $\alpha_1 = 0,68$ , тобто приймає значення як у випадку нормально розподіленої випадкової величини.

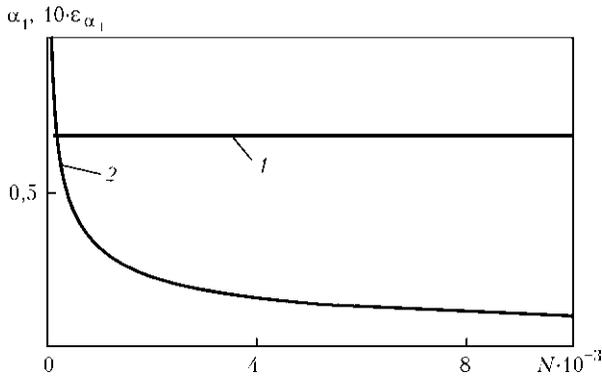


Рис. 2. Залежність коефіцієнта довіри  $\alpha_1$  від числа зареєстрованих інтервалів  $N$  (1) при різних значеннях  $\epsilon_{\alpha_1} = 1/\sqrt{N}$  (2)

**Достовірність оцінки відношення інтенсивностей світлового сигналу.** В умовах нестабільності джерела збуджуючого світла, що впливає на точність оцінки параметра речовини, доцільно відмовитися від абсолютних вимірювань і перейти до відносних стосовно інтенсивності  $n_0$  збуджуючого світла [7–9]. Для лінійних ефектів взаємодії світла і речовини із фізичних міркувань випливає, що у цьому випадку параметр контрольованого об’єкта буде пропорційний вже відношенню інтенсивностей  $n/n_0$  інформаційного  $X_1(t)$  і опорного  $X_2(t)$  потоків. Нехай в результаті експерименту зареєстровано  $N$  значень інтервалу  $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N$  між суміжними імпульсами інформаційного потоку і  $M$  значень інтервалу  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$  опорного потоку. Методом максимуму правдоподібності для оцінки відношення інтенсивностей одержимо вираз [3]:

$$\left(\frac{n}{n_0}\right) = N \sum_{j=1}^M \xi_j / M \sum_{i=1}^N \vartheta_i. \quad (4)$$

Математичне сподівання оцінки:

$$[(n/n_0)] = \frac{N}{(N-1)n_0} n,$$

дисперсія:

$$D_{(n/n_0)} = \frac{n^2}{n_0^2} \left( \frac{1}{N-2} + \frac{1}{M} \right),$$

відносна середньоквадратична похибка при  $N, M \rightarrow \infty$ :

$$\delta_{(n/n_0)} = \sqrt{1/N + 1/M}.$$

Якщо прийняти  $N = M$ , то  $\delta_{(n/n_0)} = \sqrt{2/N}$ . Тобто, використовуючи оцінку (4), нам апіорі відомо, що якщо ми хочемо оцінити  $\eta$  з відносною похибкою  $\delta\hat{\eta} = \delta_3 = \text{const}$ , то для цього необхідно зареєструвати кількість значень інтервалу інформаційного та опорного потоків, рівну  $N = 2\delta_{(n/n_0)}^{-2}$ .

Для визначення довірчого інтервалу для  $n/n_0$  знову використаємо метод, який ґрунтується на знаходженні густини розподілу відношення оцінки  $(n/n_0)$  до самого відношення інтенсивностей. Густина розподілу випадкової величини  $y = (n/n_0)/(n/n_0)$  дорівнює:

$$p(y) = \frac{(N+M-1)!}{(N-1)!(M-1)!} \left(\frac{M}{N}\right)^M \frac{y^{M-1}}{(1+My/N)^{N+M}}.$$

Довірчий інтервал для  $(n/n_0)$  означимо формулою

$$\max\{0, (1 - \epsilon_{\alpha_2})\} (n/n_0) < (n/n_0) < (1 + \epsilon_{\alpha_2})(n/n_0).$$

Останнім нерівностям еквівалентний вираз для коефіцієнта довіри:

$$1/\max\{0, (1 - \epsilon_{\alpha_2})\}$$

$$\alpha_2 = \int_{1/(1+\epsilon_{\alpha_2})}^{(1+\epsilon_{\alpha_2})} \frac{(N+M-1)!}{(N-1)!(M-1)!} \left(\frac{M}{N}\right)^M \frac{y^{M-1}}{(1+My/N)^{N+M}} dy.$$

Для випадку  $N = M$  коефіцієнт довіри буде:

$$\alpha_2 = \frac{(2N-1)!}{[(N-1)!]_{\max\{0, (1-\epsilon_{\alpha_2})\}}^{(1+\epsilon_{\alpha_2})}} \int x^{N-1} (x+1)^{-2N} dx. \quad (5)$$

На рис. 3 наведені криві залежності коефіцієнта довіри  $\alpha_2$  від числа  $N$  зареєстрованих інтервалів інформаційного та опорного потоків за різних значень довірчого інтервалу, який визначається  $\epsilon_{\alpha_2}$ . Бачимо, що для заданого  $\epsilon_{\alpha_2}$  коефіцієнт довіри тим більший, чим більше число інтервалів  $N$ .

Розглянемо також імовірність попадання  $(n/n_0)$  в інтервал

$$(n/n_0) - \sigma_{(n/n_0)} < (n/n_0) < (n/n_0) + \sigma_{(n/n_0)}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{(n/n_0)}$  — середньоквадратичне відхилення оцінки відношення інтенсивностей, яке дорівнює:

$$\sigma_{(n/n_0)} \approx (n/n_0) \sqrt{1/N + 1/M}$$

а при  $N = M$ :  $\sigma_{n/n_0} \approx (n/n_0) \sqrt{2/N}$ .

Тоді вираз (6) запишемо у вигляді  $(n/n_0)(1 - \sqrt{2/N}) < (n/n_0) < (n/n_0)(1 + \sqrt{2/N})$ , звідки  $\epsilon_{\alpha_2} = \sqrt{2/N}$ . Для коефіцієнта довіри одержимо вираз:

$$\alpha_2 = \frac{(2N-1)!}{[(N-1)!]_{(1-\sqrt{2/N})}^{(1+\sqrt{2/N})}} \int x^{N-1} (x+1)^{-2N} dx.$$

На рис. 4 наведено графік залежності коефіцієнта довіри  $\alpha_2$  від  $N$  — кількості зареєстрованих інтервалів інформаційного та опорного потоків. Бачимо, що за достатньо великого  $N$  коефіцієнт довіри приймає значення  $\alpha_2 \approx 0,68$ , тобто

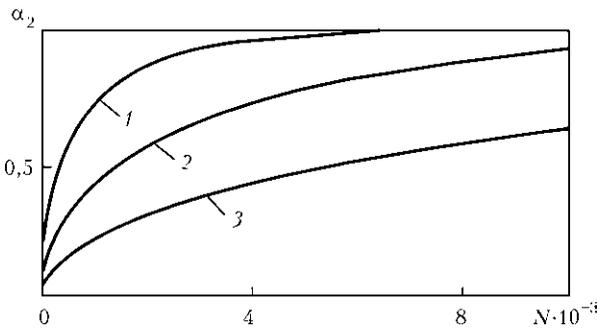


Рис. 3. Залежність коефіцієнта довіри  $\alpha_2$  від числа зареєстрованих інтервалів  $N$  для різних значень  $\epsilon_{\alpha_2}$ : 1 — 0,05; 2 — 0,025; 3 — 0,0125

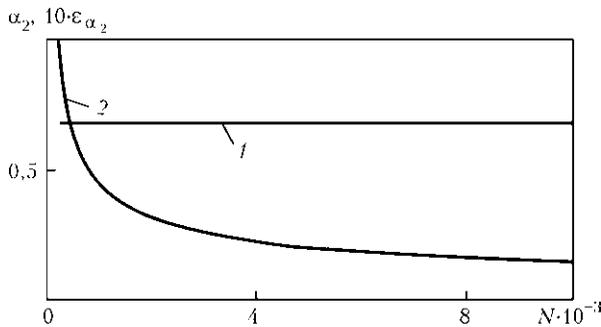


Рис. 4. Залежність коефіцієнта довіри  $\alpha_2$  від числа зареєстрованих інтервалів  $N$  (1) для  $\epsilon_{\alpha_2} = \sqrt{2/N}$  (2)

таке, як і у випадку нормально розподіленої випадкової величини.

**Достовірність оцінки різниці інтенсивностей світлового сигналу.** Суттєвим фактором, який впливає на точність вимірювання параметра речовини, є також фонові складові, обумовлені власними шумами фотоелектричного перетворювача і шумами оптичного каналу передачі. В цьому випадку потік  $X_1(t)$  відповідає сумарному сигналу, який включає фонову та інформаційну складові. Розділений в часі потік  $X_3(t)$ , який відповідає власним шумам фотоелектричного перетворювача і шумам оптичного каналу передачі одержують за допомогою «чорно-білого» модулятора, який модулює світловий потік, реєстрований перетворювачем. Тому в умовах наявності суттєвої фонові складові параметр ОК пропорційний різниці інтенсивностей  $(n - n_1)$  сумарного  $X_1(t)$  і шумового  $X_3(t)$  потоків [9, 10].

Нехай в результаті експерименту зареєстровано  $N$  значень інтервалу між суміжними імпульсами сумарного потоку  $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_N$  і  $M$  значень інтервалів шумового потоку  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$ .

Методом максимуму правдоподібності для оцінки різниці інтенсивностей одержимо [3]:

$$(n - n_1) = N / \sum_{i=1}^N \vartheta_i - M / \sum_{k=1}^M \zeta_k \quad (7)$$

Математичне сподівання оцінки:

$$[n - n_1] = n \frac{N}{N-1} - n_1 \frac{M}{M-1},$$

дисперсія:

$$D_{(n - n_1)} = \frac{n^2 N^2}{(N-1)^2 (N-2)} + \frac{n_1^2 M^2}{(M-1)^2 (M-2)},$$

відносна середньоквадратична похибка:

$$\delta_{(n - n_1)} = \sqrt{\frac{1}{N} \left( 1 + \frac{2nn_1}{(n - n_1)^2} \right)}.$$

Отже відносна середньоквадратична похибка оцінки максимальної правдоподібності різниці інтенсивностей (7) також залежить від співвідношення інтенсивностей сумарного  $n$  і шумового  $n_1$  потоків і апріорі невідомо яке потрібно вибрати  $N$ , щоб забезпечити задану відносну середньоквадратичну похибку.

Для визначення довірчого інтервалу для  $(n - n_1)$  метод, який ґрунтується на знаходженні густини розподілу відношення оцінки  $(n - n_1)$  до математичного сподівання  $(n - n_1)$  не підходить, оскільки оцінка різниці така, що густина цього розподілу буде залежати від невідомих характеристик.

За великої кількості зареєстрованих інтервалів довірчий інтервал для  $(n - n_1)$  можна знайти наближено, оскільки за великого  $N, M$  розподіл оцінки прямує до нормального [4]. Тоді ймовірність попадання  $(n - n_1)$  в інтервал

$$(n - n_1) - \epsilon_{\alpha_3} \sigma_{(n - n_1)} < (n - n_1) < (n - n_1) + \epsilon_{\alpha_3} \sigma_{(n - n_1)}$$

дорівнює  $\alpha_3 = 2\Phi(\epsilon_{\alpha_3})$ , де  $\Phi(\epsilon_{\alpha_3})$  — функція Лапласа.

При  $N = M$  середньоквадратичне відхилення визначимо як:

$$\sigma_{(n - n_1)} \approx \sqrt{(\hat{n}^2 + \hat{n}_1^2)} / N,$$

де оцінки  $\hat{n}, \hat{n}_1$ , задаються виразом (1).

Синтезований алгоритм оцінки різниці інтенсивностей із заданою відсносною похибкою [3, 9, 11] буде:

$$n - n_1 = \Delta N / \vartheta_{\Delta N} \quad (8)$$

де  $\Delta N = N_3 + 2N_1$  — кількість імпульсів різниці нагромаджених за час  $\vartheta_{\Delta N}$ ;  $N_1$  — кількість імпульсів фону, нагромажене за час, протягом якого різниця нагромаджується до величини  $N_3$ . Якщо необхідно оцінити різницю інтенсивностей двох потоків з відсносною похибкою  $\delta_{(n - n_1)} = 1/\sqrt{N_3} = \text{const}$ , то для цього згідно (8) нагромадження різниці імпульсів необхідно здійснювати не до числа  $N_3$ , а до скорегованого числа  $\Delta N$ .

Однак для алгоритму (8) характерна можливість отримання хибних результатів внаслідок існування відмінної від нуля ймовірності того, що на цикл нагромадження ми зареєструємо

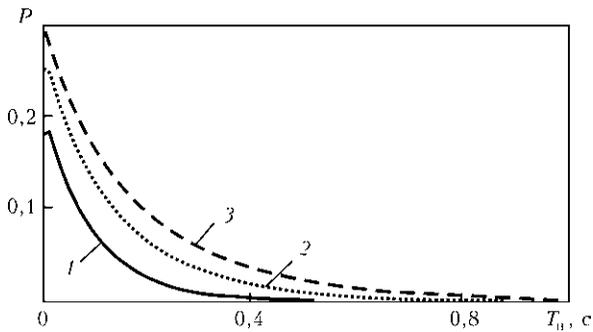


Рис. 5. Залежність ймовірності одержання від'ємної різниці від часу нагромадження  $T_n = iT$ , де тривалість циклу нагромадження  $T = 0,01$  с,  $i = 1, 2, \dots, 100$ : 1 — шукана ймовірність для інтенсивності сумарного сигналу  $n = 100$  с<sup>-1</sup>, шумового  $n_1 = 50$  с<sup>-1</sup>; 2 —  $m = 150$  с<sup>-1</sup>,  $m_1 = 100$  с<sup>-1</sup>; 3 —  $l = 200$  с<sup>-1</sup>,  $l_1 = 150$  с<sup>-1</sup>

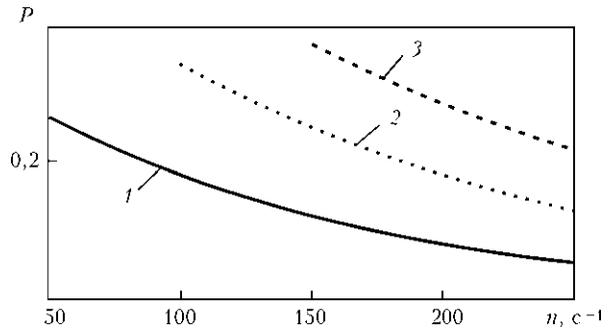


Рис. 6. Залежність ймовірності одержання від'ємної різниці від співвідношення між інтенсивністю сумарного і шумового сигналів: 1 — шукана ймовірність для інтенсивності сумарного сигналу в діапазоні  $n = 50 \dots 250$  с<sup>-1</sup>, шумового  $n_1 = 50$  с<sup>-1</sup>; 2 —  $n = 100 \dots 250$  с<sup>-1</sup>,  $n_1 = 100$  с<sup>-1</sup>; 3 —  $n = 150 \dots 250$  с<sup>-1</sup>,  $n_1 = 150$  с<sup>-1</sup>

кількість імпульсів фону більшу від зареєстрованої кількості імпульсів сумарного сигналу. У принципі, перевищення кількості імпульсів фону над кількістю імпульсів сумарного сигналу внаслідок їх випадковості ймовірно завжди для скінченних значень математичних сподівань фону і сумарного сигналу.

Отримання в результаті від'ємної різниці нагромаджених імпульсів за цикл на початку процесу нагромадження призведе до того, що внаслідок від'ємного переповнення реверсивного лічильника [10] на його виході з'явиться велике число, а в результаті отримаємо помилковий результат нагромадження.

За проведення вимірювань за цикл нагромадження тривалістю  $T$  можна одержати  $N$  імпульсів сумарного сигналу з ймовірністю [3]  $P(N|T)$  (розподіл Пуассона) і  $N_1$  імпульсів шумового сигналу з ймовірністю  $P(N_1|T)$  і, відповідно, різниця дорівнюватиме  $\Delta N = N - N_1$ . Тоді ймовірність одержання  $\Delta N$  імпульсів різниці буде:

$$P_{\Delta N} = \sum_{N_1=0}^{\infty} P(\Delta N + N_1|T)P(N_1|T) = \exp[-(n + n_1)T] \left(\frac{n}{n_1}\right)^{\Delta N} I_{\Delta N} [2T\sqrt{nn_1}],$$

де  $I_{\Delta N}(\bullet)$  — функція Бесселя чисто уявного аргумента [4].

Бачимо, що останній розподіл суттєво відрізняється від пуассонівського. Математичне сподівання одержаної різниці імпульсів:

$$[\Delta N] = nT - n_1T,$$

а дисперсія

$$D_{\Delta N} = (n + n_1)T.$$

Ймовірність ефекту перевищення кількості імпульсів фону над кількістю імпульсів сумарного

сигналу, що еквівалентно отриманню від'ємної різниці, виразимо як

$$P_{\Delta N < 0} = \sum_{\Delta N=-1}^{-\infty} P_{\Delta N}.$$

У загальному випадку для  $P_{\Delta N < 0}$  явної аналітичної залежності не отримаємо. Для виявлення характеру змін ймовірності одержання від'ємної різниці від часу нагромадження  $T_n = iT$ , де  $T$  — тривалість циклу нагромадження,  $i = 1, 2, \dots$ , при деяких співвідношеннях між інтенсивностями сумарного і шумового сигналів на рис. 5 наведені криві відповідних залежностей.

З графіків видно, що ймовірність одержання від'ємної різниці є високою для малих часів нагромадження, спадаючи під час його зростання. Вона також залежить від величин інтенсивностей сумарного і шумового сигналів.

На рис. 6 наведені залежності ймовірності одержання від'ємної різниці від співвідношення між інтенсивністю сумарного і шумового сигналів.

З рисунку бачимо, що ймовірність цієї події тим більша, чим менша інтенсивність сигналу в порівнянні з величиною фону.

Отримання від'ємної різниці нагромаджених імпульсів за цикл на початку процесу нагромадження призведе до того, що внаслідок від'ємного переповнення реверсивного лічильника на його виході з'явиться велике число, більше від числа, яке задає величину встановленої відносної середньоквадратичної похибки оцінки різниці [10]. Внаслідок цього процес нагромадження припиниться, а в результаті отримаємо помилковий результат нагромадження.

Для уникнення цієї ситуації розроблено пристрій для обчислення оцінки різниці інтенсивностей з заданою відносною середньоквадратичною похибкою і з виключеною ймовірністю отримання помилкових результатів вимірювань [11].



## Висновки

З метою оцінки достовірності одержуваних результатів реєстрації світлових сигналів при оптичному контролі об'єктів проаналізовані алгоритми оцінювання параметрів світлового сигналу з заданою відносною середньоквадратичною похибкою в умовах нестабільності потужності виходу джерела збуджувального випромінювання та наявності фонових завад оптичного каналу передачі.

Методом, який ґрунтується на знаходженні густини розподілу відношення оцінки параметра до самого параметра, отримані аналітичні вирази для довірчої імовірності та довірчого інтервалу оцінок максимальної правдоподібності інтенсивності світлового сигналу, відношення та різниці інтенсивностей.

Обґрунтована можливість та розрахована ймовірність одержання хибних результатів вимірювань різниці інтенсивностей в умовах суттєвих фонових завад при використанні алгоритму оцінки з заданою відносною середньоквадратичною похибкою.

*Для обеспечения требуемой достоверности контроля (вероятности соответствия результатов контроля действительным значениям контролируемых параметров) необходимо осуществлять оценку соответствующего параметра контролируемого объекта, связанного некоторым образом с информационным параметром оптического сигнала, с заранее заданной относительной среднеквадратической погрешностью с последующим вычислением доверительной вероятности и доверительного интервала полученной оценки параметров.*

*Для оценки достоверности получаемых результатов регистрации световых сигналов при оптическом контроле объектов проанализированы алгоритмы оценки параметров светового сигнала с заданной относительной среднеквадратической погрешностью в условиях нестабильности мощности выхода источника возбуждающего излучения и наличия фоновых помех оптического канала передачи.*

*Методом, который основан на нахождении плотности распределения отношения оценки параметра к самому параметру, получены аналитические выражения для доверительной вероятности и доверительного интервала оценок максимального правдоподобия интенсивности светового сигнала, отношения и разности интенсивностей.*

*Обоснована возможность и рассчитана вероятность получения ложных результатов измерений разности интенсивностей в условиях существенных фоновых помех при использовании алгоритма оценки с заданной относительной среднеквадратической погрешностью.*

1. Ермолов И. Н., Останин Ю. Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. — М.: Высш. шк., 1988. — 368 с.
2. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. — М.: Наука, 1981. — 640 с.
3. Клим Б. П., Почапський Є. П. Слабкі світлові ефекти та можливості неруйнівного контролю // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 1997. — № 5. — С. 99–106.
4. Гулаков И. Р., Холондырев С. В. Метод счета фотонов в оптико-физических измерениях. — Минск: Изд-во БГУ, 1989. — 256 с.
5. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Наука, 1979. — 496 с.
6. Большаков И. А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума. — М.: Сов. радио, 1968. — 464 с.
7. Апанасович В. В., Коляда А. А., Чернявский А. Ф. Статистический анализ случайных потоков в физическом эксперименте. — Минск: Изд-во БГУ, 1988. — 276 с.
8. Демчук М. И., Иванов М. А. Статистический одноквантовый метод в оптико-физическом эксперименте. — Минск: Изд-во БГУ, 1981. — 176 с.
9. Клим Б. П., Почапський Є. П., Микитин Г. В. Фотометричні вимірювання параметрів оптичних сигналів при неруйнівному контролі якості матеріалів // Вісн. Терноп. держ. техн. ун-ту. — 1999. — № 2. — С. 23–29.
10. Клим Б. П., Почапський Є. П. До питання достовірності фотометричних методів контролю // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — 2000. — Вип. 5. — С. 127–132.
11. Клим Б. П., Почапський Є. П. Устройство оценки параметров, контролируемых оптическим методом объектов с заданной относительной среднеквадратической погрешностью // Метрология. — 1998. — № 3. — С. 32–41.

Надійшла до редакції  
05.04.2012

## Двадцатая юбилейная международная конференция и блиц-выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

1–5 октября 2012 г.

Гурзуф, Крым, Украина

### Организатор

ООО УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»

Тел.: +38 067 708 93 95, +38 044573 30 40

E-mail: minina3@voliacable.com; office@conference.kiev.ua



# МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

**И. О. СКАЧКОВ**, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

*Рассмотрена возможность создания однофакторной системы мониторинга качества сварных точек с использованием механизма вейвлет-преобразований. Показано, что близкие по прочности сварные точки имеют близкие формы детализирующих компонент вейвлет. Осуществление мониторинга технологического процесса сварки требует одновременного анализа всех детализирующих компонент вейвлет-разложения.*

*A possibility of creation of a single-factor system of monitoring the quality of weld nuggets using the mechanism of wavelet-transformations is considered. It is shown that weld nuggets of similar strength have similar forms of detalizing wavelet components. Monitoring of technological process of welding requires simultaneous analysis of all the detalizing components of wavelet decomposition.*

Стремление предприятий к достижению конкурентных преимуществ и повышению экономической эффективности стало мощным стимулом для совершенствования бизнес-технологий [1]. Вместе с тем процессы глобализации промышленного производства способствуют дальнейшей унификации и стандартизации методов управления всеми процессами предприятия. На сегодня наличие у компании понятного как потребителям, так и партнерам системы управления предприятием является необходимым условием обеспечения высокой конкурентоспособности продукции. Такие стандартизированные подходы к управлению предприятием получили обобщенное название системы менеджмента качества (СМК). По сути, СМК представляет собой совокупность методик выявления проблем и постановки задач, которые необходимо решать на различных этапах производства и методов (инструментов) их решения. Широкое распространение на сегодня как в мире, так и в Украине получили СМК, построенные в соответствии с требованиями международного стандарта ISO 9001:2008 «Quality management systems. Requirement».

Для процесса производства стандарт ISO 9001:2008 предъявляет определенные требования к организации деятельности предприятия. Особые требования СМК выдвигает к производственным процессам, недостатки которых могут быть наверняка выявлены только в процессе эксплуатации продукции. Это означает, что результаты деятельности не могут быть должным образом проверены на соответствие требованиям измерением параметров технологического процесса, т. е. качество продукции подтверждается только в процессе ее эксплуатации. К таким технологическим процессам принято относить сварку.

В соответствии с требованиями ISO 9001:2008 в этом случае предприятию необходимо предос-

тавить объективные доказательства того, что технологический процесс производства в сочетании с организационными мероприятиями способны обеспечить требования к эксплуатационным свойствам сварной конструкции. Такими доказательствами являются статистически обоснованные планы выборочного контроля сварных соединений по адекватным относительно выбранных групп дефектов методиками. Предприятие должно иметь процедуру утверждения технологических процессов сварки, выбора и технического обслуживания оборудования. Отдельной процедурой устанавливаются правила аттестации сварщиков. Таким образом, предприятием обеспечивается стабильность условий производства. В некоторых случаях предприятию необходимо предоставить потребителю доказательства того, что производство осуществляется в стабильных условиях и нарушений технологического процесса не было.

Наиболее широко применяемым при производстве сварных конструкций методом подтверждения качества соединений является выборочный разрушающий и неразрушающий контроль. Очевидно, что выборочный контроль может дать только вероятностную оценку качества тех изделий, которые идут в эксплуатацию.

Основной показатель качества сварного соединения при контактной точечной сварке — прочность точки — может значительно снизиться, если на сварочную машину и зону сварки будут действовать возмущения. При относительно малом значении отдельных возмущений одновременное действие на объект в случае их неблагоприятного сочетания также может вызвать значительную вариабельность прочностных характеристик сварной точки [2]. Этим можно объяснить периодическое появление дефектных соединений даже при строгом соблюдении технологии сварки. Как следствие, для повышения надежности и прочности конструкции количество точек на кузове ав-



томобили устанавливается примерно на 30% больше, чем было бы необходимо при их гарантированном качестве [3].

Подтверждение соответствия хода технологического процесса заданным параметрам осуществляют, как правило, путем мониторинга параметров режима [4, 5] или состояния оборудования. Однако такой подход позволяет контролировать только стабильность затраченной энергии (или удельной энергии) при образовании называемого соединения и имеет существенные недостатки. Во-первых, поскольку каждый из параметров режима задается с определенными допускками, то возможно такое неблагоприятное сочетание параметров режима в пределах допусков, при котором вероятно возникновение дефекта. Во-вторых, контроль соответствия энергетических и кинематических параметров режима заданным значениям не позволяет определить особенности хода процесса образования соединения, который может быть нарушен технологическими возмущениями. Известные системы мониторинга технологического процесса контактной точечной сварки, основанные на оценке энергетических параметров режима, требуют измерения как сварочного тока, так и напряжения, что существенно усложняет систему измерений.

**Постановка задачи.** Целью работы является определение соответствия технологического процесса контактной точечной сварки переменным током низкоуглеродистых сталей заданным требованиям. Такой технологический процесс в простейшем случае состоит из четырех этапов: сжатие, нагрев, проковка, пауза. Параметрами режима при этом есть сварочный ток, время нагрева, усилие сжатия электродов, размеры рабочей поверхности электродов.

Практически все параметры режима, кроме временных интервалов, могут меняться во время технологического процесса изготовления изделия. Течение процесса сварки нарушается как из-за нестабильности напряжения питающей сети, так и из-за изменения импеданса сварочного контура машины и изменения плотности сварочного тока, протекающего через свариваемую точку. Изменение импеданса обусловлено как внесением в контур ферромагнитных масс в процессе сварки конструкции, так и нестабильностью усилия сжатия электродов, геометрических размеров рабочей поверхности электродов из-за износа, толщины и качества подготовки поверхностей свариваемых деталей. В некоторых случаях возможно также нарушение условий формирования сварной точки из-за шунтирования сварочного тока ранее сваренными точками.

Мониторинг процесса по параметрам режима, поддающихся измерению, имеет ограниченные возможности прогнозирования качества сварного

соединения, поскольку не позволяет выявить наличие таких опасных возмущений, как шунтирование сварочного тока раньше сварными точками и изменение геометрии электродов.

**Методика мониторинга технологического процесса контактной точечной сварки.** Установка контактной точечной сварки переменным током представляет собой нелинейный трансформатор с повышенным магнитным рассеянием, который нагружен на индуктивно-активное сопротивление и питается от сети переменного тока через тиристорный контактор. Существенная индуктивность сварочного трансформатора приводит к тому, что угол открытия тиристорных контакторов превышает 90 электрических градусов и форма импульсов сварочного тока далека от синусоидальной.

Учитывая, что практически все возмущения (кроме изменения напряжения питающей сети) приводят к изменению сопротивления во вторичном контуре сварочной машины, возникает возможность оценить уровень возмущений по изменению формы импульса сварочного тока.

Влияние изменения активного сопротивления на форму импульса сварочного тока осуществляли с помощью компьютерной модели, построенной в среде Simulink пакета Matlab (рис. 1).

Сварочный трансформатор  $T$  моделировался как трансформатор с повышенным магнитным рассеянием с параметрами, полученными путем расчета реальной контактной машины. Первичная обмотка рассчитана на питание от сети АС 50 Гц напряжением 380 В. Модель легко позволяет учитывать переменный коэффициент трансформации. В модель входит также вторичный контур трансформатора, представленный резистором  $R_k = 140$  мкОм и индуктивностью  $L_k = 0,5$  мкГн.

Тиристорный контактор  $VS1 - VS2$  управляется фазовращателем  $FC$ , который формирует отпирающие импульсы со сдвигом по фазе на  $\alpha$  электрических градусов относительно напряжения сети. Сигнал напряжения сети поступает на  $FC$  с измерительного блока  $U_s$ . Изменение тока осуществляется блоком  $I$ .

Сварная точка моделируется активным резистором  $R$ . В модели принято предположение о неизменности сопротивления точки на протяжении цикла сварки. Для оценки влияния возмущений параметры модели меняли в пределах 10 % номинальных. Таким образом, активное сопротивление сварной точки составляло 115 и 126,5 мкОм [6], индуктивность контура машины в пределах 0,50 и 0,55 мкГн, напряжение сети питания 380 и 342 В. Угол открытия тиристорного контактора 90 эл. градусов.

При моделировании фиксировалось мгновенное значение тока во вторичном контуре. Оценка действующего значения тока осуществлялась бло-

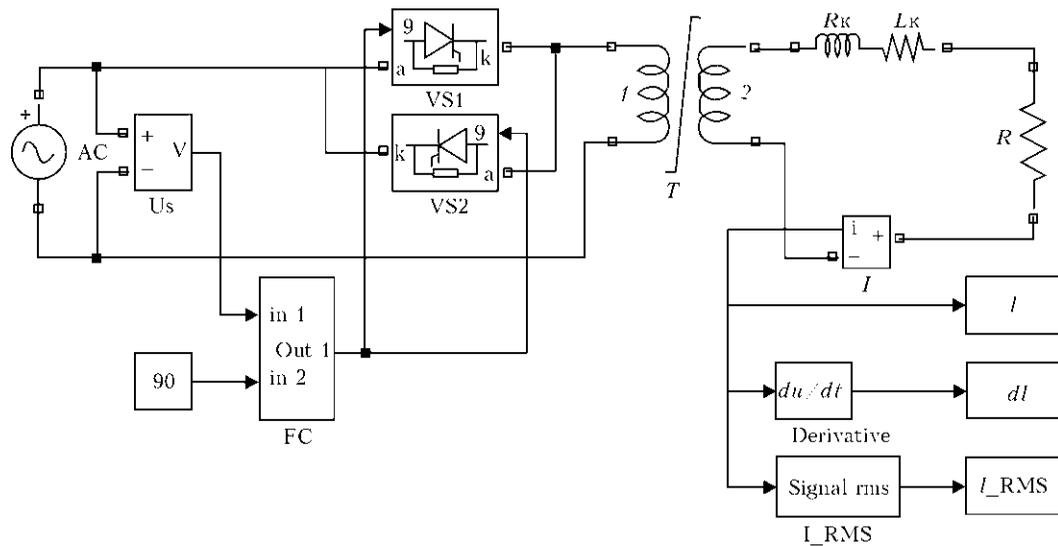


Рис. 1. Компьютерная модель процесса контактной точечной сварки

ком RMS модели. Поскольку наиболее применяемым методом измерения сварочного тока при контактной точечной сварке является пояс Роговского, то дополнительно фиксировалась также первая производная от тока контура посредством стандартного блока дифференцирования Simulink  $du/dt$ . Полученные данные передавались в рабочую область Matlab как переменные  $I, dI, I\_RMS$ .

Изменение амплитудного значения напряжения питающей сети, индуктивности контура или активного сопротивления участка электрод-электрод приводит к изменению длительности и формы импульса тока (рис. 2, а). Заметное изменение формы импульса сварочного тока показано также

на графиках первой производной тока по времени (рис. 2, б).

Расчетное действующее значение сварочного тока при этом составляло 5991 А для номинального режима, 5814 А для возмущения с сопротивлением электрод-электрод, 5817 А для возмущения по индуктивности контура, 5391 А для возмущения по напряжению сети. Таким образом, уменьшение тока составляло от 3 до 10 %.

Оценку формы импульса сварочного тока проводили с применением дискретного вейвлет-анализа, что позволяет рассматривать сигнал как функцию от времени в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте [7]. Анализ про-

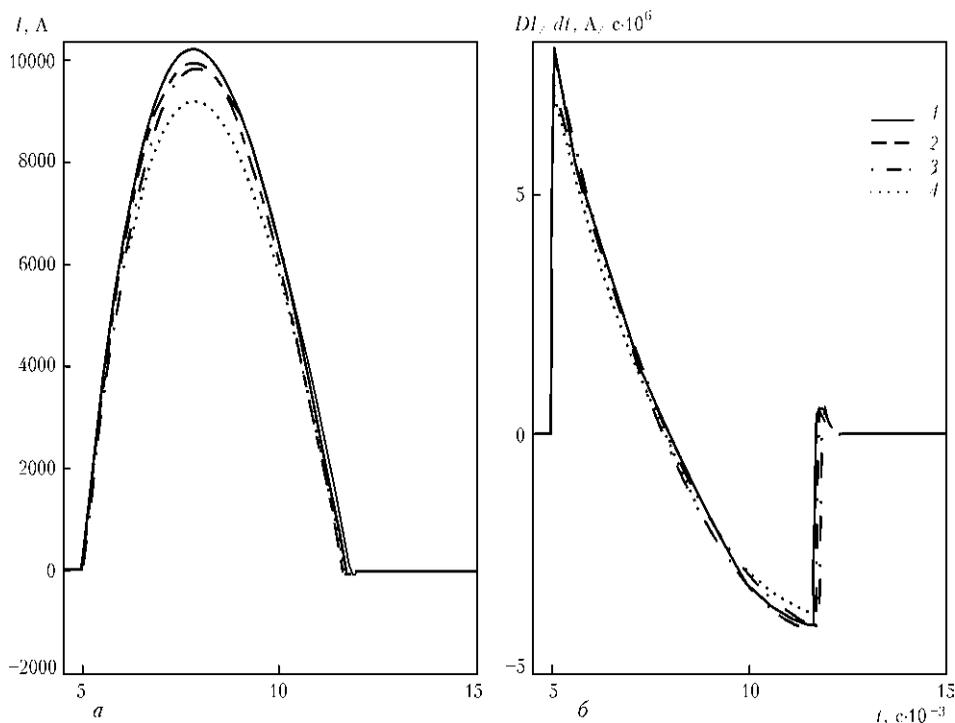


Рис. 2. Форма импульса тока (а) и его первой производной (б): 1 — номинальный режим; 2 — увеличенное сопротивление электрод-электрод; 3 — увеличенная индуктивность контура; 4 — уменьшенное напряжение сети

водили с применением вейвлетов Добеши [8] с помощью пакета расширения Wavelet Toolbox системы Matlab. Выявление различий между формами кривых тока при действии возмущений на технологический процесс осуществляли сравнением составляющих сигнала определенного уровня, восстановленных по детализирующим коэффициентам вейвлет-разложения.

Для сравнения различия между компонентами сравниваемых сигналов, введем обобщенный показатель нормы

$$P = \sqrt{\sum (x_i - x_{ni})^2},$$

где  $x_i$  — значение координат вектора компоненты вейвлет-разложения заданного уровня исследуемого сигнала;  $x_{ni}$  — соответствующее значение компоненты вейвлет-разложения заданного уровня сигнала, соответствующего номинальному режиму.

Отличие детализирующих компонент по уровням вейвлет-преобразования существенно зависит от вида возмущений (рис. 3) и для первой производной сварочного тока является значительной.

Наиболее существенные различия наблюдаются для компонент вейвлет-преобразований, соответствующих высокочастотным составляющим сигнала. Анализ также показывает, что различия локализованы в основном в зоне затухания импульса (рис. 4).

**Экспериментальная проверка методики мониторинга.** Проверку метода мониторинга проводили при сварке образцов из низкоуглеродистой стали на машине МТ-1215. Ток сварки фиксировали с помощью пояса Роговского. Образцы сваривали при одинаковых настройках машины. Аналого-цифровое преобразование полученного сигнала осуществляли АЦП Е-140 фирмы «Lcard» с частотой 100 кГц. Обработку данных проводили в среде системы Matlab.

Качество сварных точек проверяли механическими испытаниями на срез в соответствии с ГОСТ 6996–66. Прочность сварных точек находилась в пределах 3200...6390 Н. Причинами разброса значений предположительно является подготовка свариваемых поверхностей.

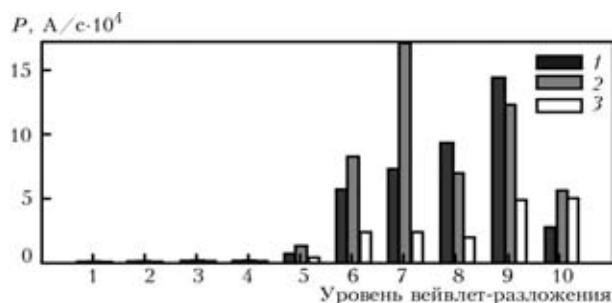


Рис. 3. Показатель нормы для возмущений: 1 — увеличенное сопротивление электрод–электрод; 2 — увеличенная индуктивность контура; 3 — уменьшенное напряжение сети

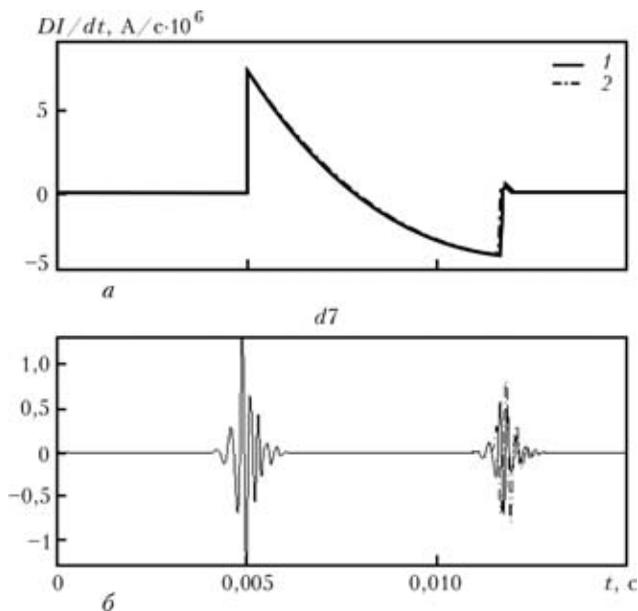


Рис. 4. Первая производная сварочного тока (а) и детализирующей компоненты 7 (б) уровня вейвлет-разложения номинального режима (1) и для возмущений по активному сопротивлению электрод–электрод (2)

Оценку нормы проводили относительно образца, имеющего наивысшую прочность на срез. Близкие по прочности образцы имели близкие значения нормы для детализирующих компонент вейвлет-разложения с малыми номерами, т. е. соответствующими низкочастотной составляющей сигнала (рис. 5). Следует отметить, что для осуществления мониторинга технологического процесса сварки необходимо осуществлять одновременный анализ всех детализирующих компонент вейвлет-разложения.

### Выводы

Мониторинг технологического процесса контактной точечной сварки можно осуществлять по форме сигнала, пропорционального первой производной сварочного тока. Имеющиеся в процессе сварки возмущения влияют на форму сигнала.

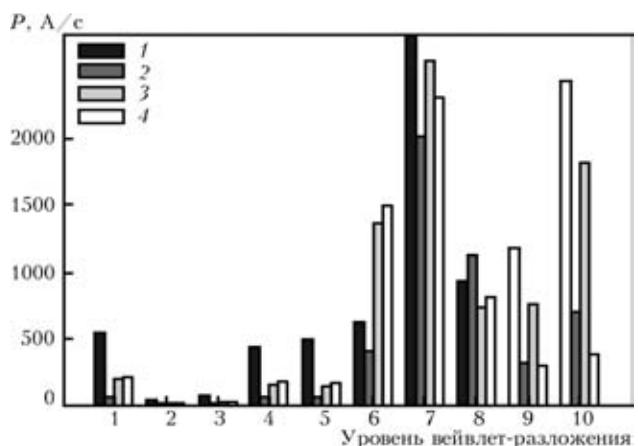


Рис. 5. Показатели нормы для сварных точек: 1 — 3200 Н; 2 — 4837; 3 — 4620; 4 — 4569



Анализ формы сигнала с целью установления соответствия условий сварки и качества соединения требованиям целесообразно осуществлять с помощью дискретного вейвлет-анализа с использованием вейвлетов Добеши.

Дальнейшее развитие метода мониторинга технологического процесса контактной точечной сварки необходимо проводить в направлении идентификации возмущений.

1. *Портер М.* Конкуренция. — СПб: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 495 с.
2. *Дорофеев А. Н.* Расчет прочности сварных точечных соединений. — М.: Машиностроение, 1964. — 139 с.
3. *Оценка качества контактной точечной сварки с помощью нейронных сетей / Б. Е. Патон, Н. В. Подола,*

- В. С. Гавриш, В. В. Лукович // Автомат. сварка. — 1998. — № 12. — С. 3–10.
4. *Cho Y., Rhee S.* Primary circuit dynamic resistance monitoring and its application to the quality estimation during resistance spot welding // *Welding J.* — 2002. — **81**, № 6. — P. 104–111.
  5. *Monitoring of spot welding by measurement of voltage between electrode tips / S. Nakata, M. Nishikawa, Y. Kurozumi, H. Okuno.* // *Transactions of Japan welding society.* — 1979. — **10**, № 1.
  6. *Пахаренко В. А.* Зварювання тиском. — Киев: Екотехнологія, 2011. — 272 с.
  7. *Дремлюк И. Е., Иванов О. В., Нечитайло В. А.* Вейвлеты и их использование // *Успехи физ. наук.* — 2001. — **171**, № 5. — С. 465–501.
  8. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. — М.: РХД, 2001.—210 с.

Поступила в редакцию  
03.04.2012

## НОВЫЕ КНИГИ

Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко  
**Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение.** — Киев.: Изд-во «ИНДПРОМ», 2012. - 312 с.

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

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

Альбом представляет интерес для широкого круга инженеров и научных работников технических специальностей.



**Акустична емісія при діагностуванні стану сховищ аміаку ВАТ «Одеський припортовий завод» / Під ред. проф. А.Я. Недосеки.** К. Вид-во «ИНДПРОМ», 2012.— 96 с.

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



## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛА ДЛЯ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, В. П. ДЯДИН, канд. техн. наук, Р. И. ДМИТРИЕНКО,  
А. В. БЕРНАЦКИЙ, А. Е. ЛИТВИНЕНКО, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Проведен сравнительный анализ требований к ударной вязкости материала баллонов высокого давления для хранения технических газов по ГОСТ 949–73 и Европейским нормам ISO 9809-1: 2010 (E). На экспериментальном примере показано, что отечественные нормы, предъявляемые к вязкости и прочности материала, устарели и значительно уступают европейским требованиям. Предложен инженерный подход к оценке необходимого уровня вязкости материала в зависимости от прочностных свойств и толщины стенки баллона.*

*Comparative analysis of requirements of GOST 949-73 and European norms ISO 9809-1:2010 (E) to impact toughness of materials of high-pressure cylinders for commercial gas storage has been performed. It is shown in an experimental case that local norms to material toughness and strength are greatly inferior to European requirements and are extremely outdated. A new engineering approach to assessment of the require level of material toughness, depending on strength properties and wall thickness of the cylinder, is proposed.*

При изготовлении баллонов высокого давления для хранения технических газов предъявляемые требования к вязкости используемых материалов по ГОСТ 949–73 и ISO-9809-1 имеют существенные различия.

Так, в Украине требования к баллонам высокого давления для технических газов определены ГОСТ 949–73, который без изменений был введен взамен ГОСТ 949–57, т. е. отечественные нормативные требования к изготовлению баллонов и материалам не пересматривались уже более 50 лет и устарели.

В Европе требования, предъявляемые к стальным баллонам, регламентированы документом ISO 9809-1: 2010 (E), который предполагает использование современных материалов с временным сопротивлением до 1100 МПа, имеющих высокую вязкость. Это позволило не только уменьшить массу баллона, но и повысить рабочее давление, что делает их более экономичными при производстве и эксплуатации.

Сравнение нормативных документов, регламентирующих процедуру изготовления и требования к изделиям в Украине и Евросоюзе, позволяют не только выявить их различие, но и оценить влияние тех или иных условий на надежность изделий в процессе их эксплуатации.

В данной работе представлены экспериментальные данные ударной вязкости образцов, изготовленных в соответствии с ГОСТ 949–73 и ISO-9809-1, и проведен их сравнительный анализ.

Так, по ГОСТ 949–73 оценка ударной вязкости материала проводится на образцах с круглым надрезом (KCU) при температуре +20 °С, тогда как температура эксплуатации баллонов разрешена до –50 °С. Естественно, что данное требование не

позволяет гарантировать необходимую вязкость материала при эксплуатации баллонов при температурах ниже 20 °С.

В ISO 9809-1: 2010 (E) склонность металла к хрупкому разрушению (в отличие от ГОСТ 949–73) определяется несколькими параметрами: оценкой значения ударной вязкости на образцах с острым надрезом (KCV) при температуре –50 °С и отсутствием хрупкой составляющей на поверхности разрыва контрольного баллона из каждой партии при его гидравлическом испытании до разрушения. Кроме того, предъявляются требования к форме и границам краев разрыва.

Введение дополнительного требования в ISO 9809-1: 2010 (E) к поверхности и форме излома в значительной мере позволяет исключить возможность хрупкого и осколочного разрушения баллона как при эксплуатации, так и его последующих гидроиспытаниях. В отечественных нормах это условие полностью игнорируется, что в случаях нарушения правил эксплуатации баллона очень часто приводит к его осколочному разрушению (до 300 осколков) и поражению людей.

В табл. 1 приведены результаты гидравлического испытания ряда баллонов до разрушения с различными сроками предварительной эксплуатации. Видно, что все разрушенные баллоны не удовлетворяют требованию отсутствия хрупкой составляющей на поверхности разрыва. Как пример, на рис. 1 представлены фотографии поверхностей разрывов пяти исследованных баллонов, которые не соответствуют требованиям к форме и границам краев разрывов.

Существенными отличиями отечественных и европейских норм являются требования к форме, размерам, типу, ориентации ударных образцов и

Таблица 1. Результаты испытаний кислородных баллонов из стали Де

Номер баллона	Год изготовления	Срок службы, лет	Исходные данные			Значения ударной вязкости в осевом направлении металла разрушенных баллонов			Разрушающее давление, МПа	Запас прочности $P_{разр} / P_{раб}$	Кольцевая относительная деформация после разрушения, %
			Среда	Диаметр паружный (среднее значение), мм	Толщина стенки min/ср, мм	KCV, Дж/см <sup>2</sup> , +20 °С	KCV, Дж/см <sup>2</sup> , +22 °С	KCV, Дж/см <sup>2</sup> , -10 °С			
Б1	1964	45	Кислород	220,95	5,6/7,645	—	31,1 34,2	19,9 21,8	49,87	3,393	1,58
Б2	1957	52	—	221,37	7,26/8,184	—	33,8 36,7	21,3 23,8	51,42	3,498	4,15
Б3	1991	18	Аргон или закись азота	220,68	4,5/8,442	—	16,9 19,4	9,6 13,2	55,13	3,75	1,58
Б4	1973	36	Кислород	219,52	6,1/7,369	—	36 44	26,6 29,3	48,3	3,286	3,97
Б5	1960	49	—	219,89	7,4/7,659	82,2* 83,3*	33,7 39,1	16,9 17,2	47,27	3,216	4,76
Б8	1961	48	—	220,95	7,4/8,082	—	—	—	51,85	3,527	—
Б9	1953	56	—	218,77	7,8/8,647	—	—	—	49,32	3,355	—
Б19	2007	1	—	221	7,41/8,571	—	—	—	56,8	3,864	—
Б20	2009	0,5	—	220,79	7,3/8,028	47,2 51,3 52,2	25,9 26 26,3	—	58,97	4,012	—
Допускаемые значения / ПД			—	—	0,68/п. 1.2 ГОСТ 949–73	29,4/п. 2.2 ГОСТ 949–73	—	—	38,2	2,6 / ГОСТ 949–73	—
Б5 до гидроиспытаний						82,2 83,3	56 59	24,4 24,5	—	—	—

*Примечания.* Рабочее давление (по ГОСТ 949-73) — 14,7 МПа; характер разрушения в изломе — квазихрупкий; \* – значения, полученные до гидроиспытаний; завод-изготовитель баллонов — ММК им. Ильича (бывший Ждановский)

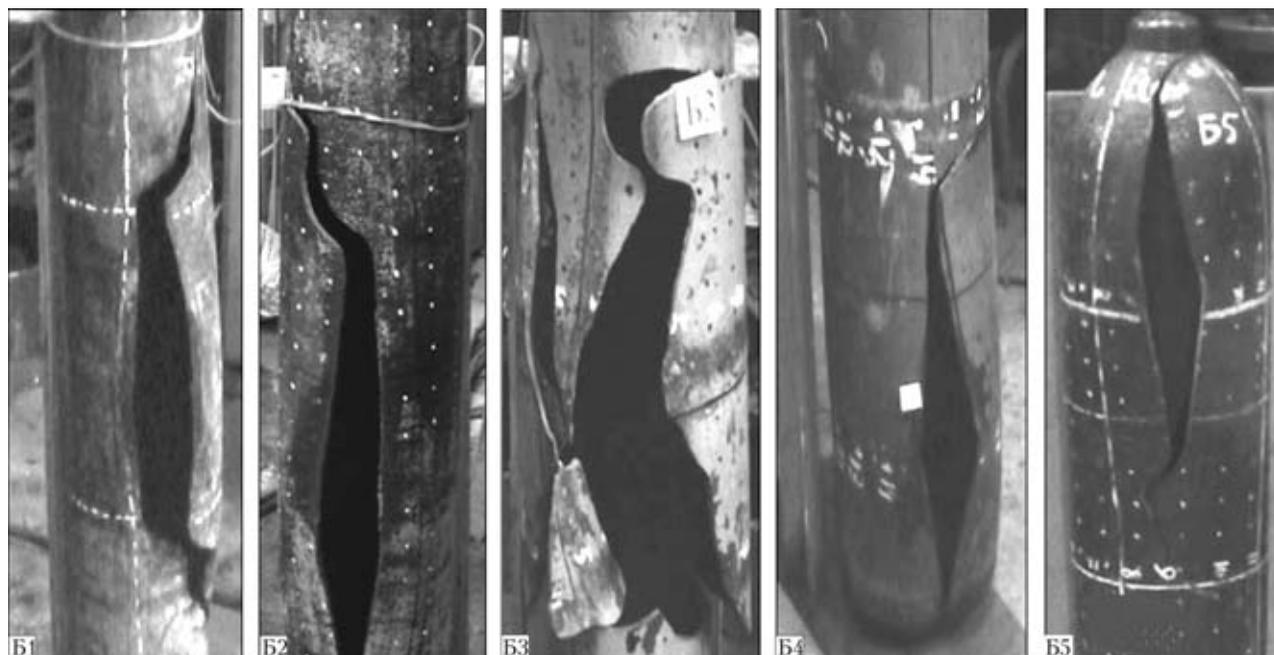


Рис. 1. Форма и границы краев разрушений исследованных баллонов Б1–Б5



допускаемым значениям ударной вязкости. Сравнение этих требований представлены в табл. 2.

Ориентация образцов и их форма показаны на рис. 2.

Важно отметить требования к поверхности механической обработки образцов. Так, по европейским нормам для образцов в кольцевом направлении на внешней и внутренней стороне баллонной стенки механическая обработка не проводится.

Как видно из представленных в табл. 1 результатов, значения ударной вязкости в продольном направлении для исследованных шести баллонов не удовлетворяют требованию ISO 9809-1: 2010 (E) даже при температуре +20 °С, не говоря уже о более низких температурах. Отметим, что данный вывод является несколько условным, поскольку не учитывает влияние предварительного деформирования стенки баллона при его гидравлическом нагружении до разрушения (образцы на ударный изгиб изготавливали после разрушения баллона) [1]. Вместе с тем существенное различие между полученными экспериментальными значениями ударной вязкости в продольном направлении и требованиями ISO 9809-1:2010 (E) не может не настораживать.

К сожалению, оценка значения ударной вязкости на стандартных образцах Менаже в странах

СНГ до сих пор имеет место несмотря на то, что практически во всем мире используется образец Шарпи. При этом основной довод в пользу образца Менаже сводится к тому, что данный радиус закругления (1,0 мм) позволяет более полно охватить исследуемую зону сварного соединения или основного металла. Вместе с тем, как отмечено в работе [2], «отсутствие стеснения материала перед надрезом образца Менаже не позволяет воссоздать реальную картину распределения напряжений в процессе разрушения, присущую трещиноподобному дефекту в конструкции. В этой связи определяемая температура вязко-хрупкого перехода на данном типе образца сдвигается в область более низких температур, что не соответствует реальной картине разрушения конструктивных элементов».

Температурная же зависимость значения ударной вязкости стандартного образца Шарпи, в отличие от аналогичной зависимости Менаже, достаточно хорошо характеризует сопротивление конструктивных материалов возможному разрушению и позволяет более достоверно оценить температуру вязко-хрупкого перехода для исследуемого диапазона толщин. Хотя и в этом случае критерий переходной температуры, основанный на определенном уровне энергии, не является постоянным и изменяется в зависимости от материала.

Подобные трудности имеют место и с определением переходной области по проценту волокна в изломе, хотя именно такой подход позволил решить проблему протяженных трещин в магистральных нефте- и газопроводах [3].

Для более детального изучения вязких свойств отечественных баллонов в рабочем интервале температур и минимизации влияния предварительного деформирования металла на значение ударной вязкости при проведении серии гидроиспытаний кислородных баллонов до разрушения был проведен дополнительный анализ полученных результатов. При этом учитывали следующие факторы:

- наличие хрупкой трещины с разветвлением;

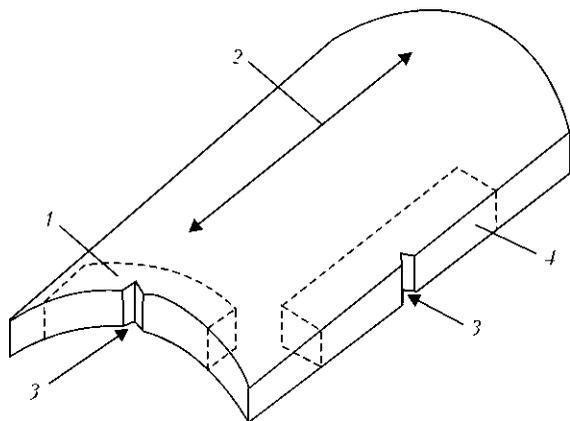


Рис. 2. Схема вырезки и ориентация образцов на ударную вязкость из стенки баллона: 1, 4 — для испытаний соответственно в кольцевом и продольном направлениях; 2 — продольная ось баллона; 3 — ориентация надреза

Таблица 2. Допустимые значения на ударную вязкость в соответствии с требованиями ISO 9809-1: 2010 (E) и ГОСТ 949-73

Данные	ГОСТ 949-73	ISO 9809-1: 2010 (E)			
		продольное направление		кольцевое	
Диаметр баллона D, мм	>140	≤140	>140		
Ориентация образца	продольное направление	продольное направление	кольцевое		
Ширина ударного образца, мм	5,0	от 3 до 10	от 3 до 5	>5 до 7,5	>7,5 до 10
Радиус в вершине надреза, мм	1,0	0,25			
Тип образца	Менаже (KCU)	Шарпи (KCV)			
Температура испытания, °С	+20	-50			
Значение удара, не менее, Дж/см <sup>2</sup>	29,4	60	30	35	40
Допускается отдельный выпад из трех образцов (не менее)	(-)	(48)	(24)	(28)	(32)

– наличие слабдеформированных участков в баллоне после проведения гидравлического испытания до разрушения;

– относительную равномерность распределения толщины на участках, из которых будут изготавливаться образцы на ударную вязкость.

С учетом данных факторов наиболее оптимальным был признан баллон с условным обозначением Б20 2009 г. выпуска (рис. 3).

Для изготовления образцов из корпуса разрушенного баллона Б20 и проведения последующих механических испытаний на растяжение и ударный изгиб выбраны верхние и нижние части баллона, которые были наименее пластически деформированы. Высота участка в верхней части баллона выбрана равной 240 мм (определяли от горловины баллона), нижней части — 110 мм (от опорной части баллона).

Ударные образцы с острым надрезом (Шарпи) в кольцевом направлении баллона изготавливали в соответствии с рекомендациями ISO 9809-1: 2010 (Е) без обработки наружной и внутренней поверхностей. Ширина образцов в этом случае не оставалась постоянной, а варьировалась в диапазоне от 7,5 до 8,5 мм в зависимости от толщины стенки в местах вырезки. По аналогии с образцами Шарпи были также изготовлены образцы с круглым надрезом (Менаже).

В продольном направлении также были изготовлены образцы Менаже и Шарпи шириной 7мм.

*Результаты испытаний на ударную вязкость баллона Б20 и их обсуждение.* Испытания на ударную вязкость проводили при температурах +120; +100; +80; +60; +20; 0; -20; -40 и -50 °С. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи и Менаже, изготовленных в кольцевом и осевом направлении стенки баллона, приведены на рис. 4, 5.

Как видно из рис. 4, ударная вязкость баллона Б20 соответствует требованиям ГОСТ 943–73 до -50 °С, в то время как по европейским нормам требование к ударной вязкости выполняется только при температуре свыше +60 °С при толщине стенки баллона не более 7,5 мм. Видно, что исследуемый материал баллона Б20 (сталь Дс) характеризуется незначительным изменением величины поглощенной энергии в рассмотренном температурном интервале. Это несколько затрудняет оценку температурной области, в которой ожидается переход от одного микромеханизма разрушения к другому, по заранее установленному уровню энергии или по доле волокна в изломе.

Если использовать температурный критерий, соответствующий 50 % содержанию волокна в изломе ударного образца, то, как видно из рис. 5, допустимая температура эксплуатации, опреде-



Рис. 3. Общий вид кислородного баллона Б20 после его разрушения избыточным давлением

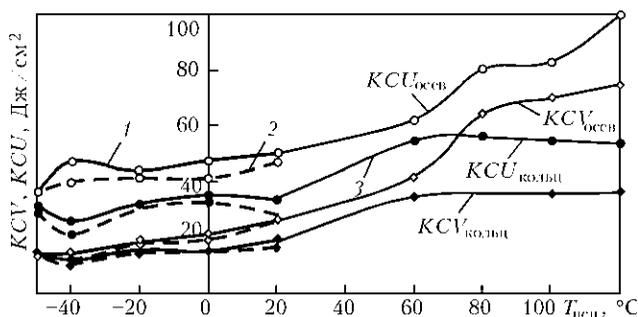


Рис. 4. Результаты испытаний образцов Менаже (KCU) и Шарпи (KCV), вырезанных в кольцевом и продольном направлениях из баллона Б20 в зависимости от температуры: 1 — средние; 2 — минимальные; 3 — единичные значения

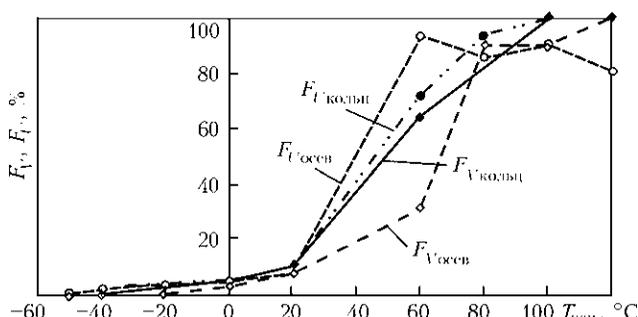


Рис. 5. Процентное содержание волокна в изломе образцов Шарпи (F1) и Менаже (F2) в зависимости от температуры испытания:  $F1_{\text{кольц}}$  — в изломе Менаже, ориентированном к кольцевому направлению;  $F1_{\text{осев}}$  — в продольном направлении;  $F2_{\text{кольц}}$  — в изломе Шарпи, ориентированном в кольцевом направлении;  $F2_{\text{осев}}$  — в продольном направлении



ленная по образцам  $KCU_{осев}$  должна составлять не менее плюс 40 °С. Для образца  $KCV_{кольц}$  эта температура будет составлять не менее плюс 50 °С, что близко к европейскому требованию к температуре, соответствующей ударной вязкости 35 Дж/см<sup>2</sup> (см. табл. 2). Интересно отметить, что при температуре плюс 20 °С содержание волокна в изломах для всех исследуемых типов ударных образцов не превышает 10 %, что также свидетельствует о предрасположенности данного материала к хрупкому разрушению при температуре плюс 20 °С.

На образцах Шарпи, вырезанных в кольцевом направлении ( $KCV_{кольц}$ ), выход ударной вязкости на верхнюю полку наблюдается при температуре +100 °С. Данная характеристика используется для материалов, применяемых в магистральных газопроводах, так как служит мерой способности металла тормозить начавшееся разрушение. Естественно, что такая высокая температура выхода на верхнюю полку по ударной вязкости также не позволяет решить проблему хрупкого разрушения отечественных баллонов.

Исследования ударной вязкости образцов  $KCV_{кольц}$  и  $KCV_{осев}$  при температуре ниже –20 °С показали, что ориентация образца теряет свое значение. Это связано с тем, что при этих температурах вязкая составляющая в изломах указанных образцов полностью отсутствует и зарождение разрушения начинает происходить по хрупкому механизму, т. е. перед фронтом надреза полностью реализуется объемное напряженно-деформированное состояние. Подобный эффект начинает наблюдаться и на образцах Менаже ( $KCU_{осев}$  и  $KCU_{кольц}$ ) при температуре –50 °С (см. рис. 5). Вместе с тем из рис. 4 видно, что минимальные значения ударной вязкости во всем температурном диапазоне наблюдаются только на образцах  $KCV_{кольц}$ .

В то же время, температура перехода зависит от толщины использованного для испытаний образца. Последнее связано с переходом от плоского напряженного состояния (ПНС) к плоско-деформированному состоянию (ПДС) при увеличении толщины образца. Можно ожидать, что при увеличении толщины образца в случае реализации плоской деформации переходная температура будет возрастать до некоторой предельной величины. Изучая этот эффект, Р. Макниколь [4] обнаружил, что при определении переходной температуры по стандартным ударным испытаниям образцов Шарпи шириной 10 мм стесненность в образце практически достигает своего максимального значения. Данный эффект свидетельствует о достаточно полной реализации ПДС в стандартном образце Шарпи при его ударном нагружении. Это было также подтверждено в работах Клаузинга и Холломона. В исследованиях Дж. Гросса [5] отмечено, что критическая температура для стандартного образца Шарпи практически совпадает с кри-

тической температурой для аналогичного образца удвоенной толщины.

Таким образом, использование ударных образцов с острым надрезом максимальной ширины и ориентированных в кольцевом направлении баллона является более целесообразным для оценки необходимых требований к вязкости используемого материала при изготовлении и последующей эксплуатации. В европейском стандарте именно этот факт послужил причиной необходимости испытания образца в кольцевом направлении максимальной ширины (см. рис. 1, баллон Б1).

Существенным доводом в пользу образца Шарпи служит также тот факт, что между его удельной работой разрушения и критериями механики разрушения существуют как корреляционные, так и аналитические связи, которые могут быть дополнительно использованы при определении необходимого уровня энергии для оценки температурной области вязко-хрупкого перехода [6–10].

Так, при использовании подходов нелинейной механики разрушения для аттестации ряда ответственных конструкций (глубоководных морских стационарных платформ, магистральных трубопроводов и др.) можно исключить возможность хрупкого разрушения элементов конструкции с дефектом в области номинально упругих деформаций. Для этих случаев, согласно требованиям [6], значение величины критического раскрытия трещины  $\delta_c$  должно удовлетворять условию:

$$\delta_c \geq 1,35t \frac{\sigma_{0,2}}{E}, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль упругости материала МПа;  $\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести материала МПа;  $t$  — толщина элемента, мм.

Данный уровень при  $\sigma_{0,2} = 360...450$  МПа близок к требованиям стандарта Канады [6], а также стандартов DNV и API на подводные и наземные трубопроводы повышенной эксплуатационной надежности [8].

В то же время, используя подход, предложенный в работе [9], появляется возможность установить необходимый уровень ударной вязкости для исключения возможного хрупкого разрушения элементов конструкции с дефектом в области номинально упругих деформаций.

При небольших значениях температурного сдвига  $\Delta T$  и толщинах конструктивного элемента  $t$ , близких к 10 мм, необходимый уровень ударной вязкости  $KVC^{(t)}$  будет:

$$KVC^{(t)} \geq 0,27t \frac{\sigma_{0,2}^2}{EA}, \quad (2)$$

где  $A$  — коэффициент пропорциональности, примерно равный 0,1;  $KVC^{(t)}$  — удельная работа раз-

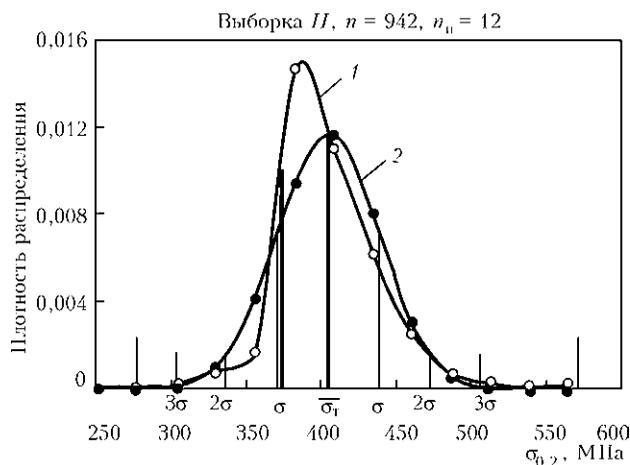


Рис. 6. Гистограмма (1) и нормированное распределение предела текучести (2): min по ГОСТ 949–73 — 373; min — 278; max — 571;  $n$  — число результатов;  $n_i$  — число интервалов;  $\Delta\sigma_{0,2}$  — ширина интервала;  $\sigma$  — стандартное отклонение

рушения стандартного образца Шарпи, Дж/см<sup>2</sup>, при температурном сдвиге  $\Delta T$ .

Из выражения (2) видно, что необходимый уровень ударной вязкости должен быть прямо пропорционален квадрату предела текучести материала и толщине конструктивного элемента.

Важно отметить, что существующие нормативные требования к материалам, ограничивающие нижние пределы прочностных характеристик, не позволяют оценить необходимое значение ударной вязкости по выражению (2).

Как пример, на рис. 6 приведена гистограмма распределения фактических пределов текучести металла марки Дс, полученных по результатам испытаний баллонов, проведенных на ММК им. Ильича (г. Мариуполь).

Минимально допустимые значения основных параметров по ГОСТ 949–73 следующие:  $\sigma_{0,2} = 373$  МПа;  $\sigma_B = 638$  МПа;  $\delta_5 = 15$  %;  $KCV$  при 20 °С = 29,4 Дж/см<sup>2</sup>; толщина — 6,8 мм (контролируется после изготовления трубы).

Из этих данных и рис. 6 видно, что при минимально допустимом пределе текучести 373 МПа максимальное его значение меняется более чем в 1,4 раза, что, в свою очередь, приводит к увеличению необходимого уровня удельной энергии  $KCV$  почти в два раза для стандартного ударного образца шириной 10 мм.

Исходя из формулы (2), нетрудно убедиться, что значение ударной вязкости  $KCV$  в кольцевом

направлении для предупреждения хрупкого разрушения кислородных баллонов, изготовленных из стали марки Дс, должно составлять около 35 Дж/см<sup>2</sup> при температуре –50 °С.

Для предотвращения хрупкого излома при гидравлическом разрушении баллона процент содержания волокна на изломе образца Шарпи, вырезанном в кольцевом направлении, должен составлять 100 %.

В рассматриваемом случае для стали марки Дс эта температура близка к 100...120 °С, что недопустимо.

## Вывод

Таким образом, для создания конкурентной базы по производству баллонов необходим переход на более современные высокопрочные материалы, которые позволили бы обеспечить оптимальные требования по вязкости и по прочностным свойствам.

1. Дядин В. П. Влияние предварительного деформирования на ударную вязкость образца Шарпи // Автомат. сварка. — 2007. — № 1. — С. 28–34.
2. Дядин В. П. Особенности испытания ударных образцов Менаже и Шарпи при хрупком разрушении // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 4. — С. 44–47.
3. Иванцов О. М., Харитонов В. И. Надежность магистральных трубопроводов. — М.: Недра, 1978. — 166 с.
4. McNicol R. C. Weld. Res. Suppl., Sept. 1965. — P. 385.
5. Гросс Дж. Влияние прочности и толщины надрезанных образцов на ударную вязкость // Ударные испытания металлов: Пер. с англ. / Под ред. Б. А. Дроздовского, Е. М. Морозова. — М.: Мир, 1973. — С. 30–63.
6. Правила классификации и постройки ПБУ и МСП/Российский морской реестр судоходства. — СПб.: РМРС, 2006.
7. CAN/CSA-S473°92. Canadian standard association. Steel structures. — Pt/III: Of the cod for the design, construction and installation of fixed offshore structures. — Publ. 1992.
8. Горынин И. В., Ильин А. В. Теоретические и экспериментальные исследования сопротивляемости хрупким разрушениям сварных конструкций для шельфа Арктики // Автомат. сварка. — 2008. — № 11. — С. 24–29.
9. Дядин В. П., Юрко Л. Я. Экспериментальная оценка температурного сдвига  $\delta_{IC}$ -кривой и хрупко-вязкого перехода конструкционных сталей и сварных соединений по результатам стандартных испытаний.—Автомат. сварка.— 2011.—№2.—С. 13–21.
10. Rolfe S. T., Gensamer M., Barsom J. M. Fracture-toughness requirements for steel. First Ann. Off-shore Technology Conf., Houston, Texas. 19–21 May, 1969.

Поступила в редакцию  
06.06.2012

## ДО ПИТАННЯ ГАРМОНІЗАЦІЇ СТАНДАРТУ ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010.

### Настанова з ультразвукового контролю зварних з'єднань металевих конструкцій. Частина 2

**Ю. В. РАДИШ**, канд. фіз.-мат. наук, **В. О. ЦЕЧАЛЬ**, інж., **А. С. КІРЄЄВ**, канд. техн. наук (ТК «Спецмонтаж»),  
**І. Я. ШЕВЧЕНКО** (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України), **В. Г. РАДЬКО**, канд. техн. наук (УкрНДІНК)

*Вирішена одна з головних проблем гармонізації уніфікованих методів ультразвукового контролю, що регламентуються європейськими стандартами (ДСТУ EN 583, ДСТУ EN 1712, ДСТУ EN 1713, ДСТУ EN 1714, BS EN 25817, ISO 5817), із національними нормами оцінки якості зварних з'єднань металоконструкцій, установлені СНиП III-18-75, СНиП 3.03.01-87 та іншими нормативними документами. Зварні з'єднання сталевих конструкцій розділяються на три категорії в залежності від типу, умов експлуатації та рівня їх відповідальності. Ці категорії визначають, відповідно, три рівня якості ультразвукового контролю, який виконується при виготовленні, монтажі, експлуатації та ремонті сталевих конструкцій. Дефекти зварних з'єднань високого, середнього та низького рівня якості приводяться у відповідність з дефектами зварних з'єднань рівнів якості B, C і D, що визначаються європейськими стандартами BS EN 25817. Таким чином досягається гармонізація цього стандарту з європейськими нормами на виконання ультразвукового контролю.*

*One of the main problems of harmonizing unified methods of ultrasonic testing, which are regulated by European standards (DSTU EN 583, DSTU EN 1712, DSTU EN 1713, DSTU EN 1714, BS EN 25817, ISO 5817) with national norms for assessment of quality of welded joints of metal structures specified by SNiP III-18D75, SNiP 3.03.01D87 and other normative documents, has been solved. Welded joints of steel structures are divided into three categories, depending on the type, service conditions and level of their importance. These categories determine three levels of quality of ultrasonic testing, which is applied in fabrication, mounting, service and repair of steel structures. Defects of welded joints of high, medium and low quality level are coordinated with the defects of welded joints of quality levels B, C and D that are determined by European standards BS EN 25817. This way harmonizing of this standard with the European norms for ultrasonic testing performance is achieved.*

Стандартом ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010 встановлено вимоги на методи, засоби і норми виконання ультразвукового (УЗ) контролю різних типів зварних з'єднань металоконструкцій з урахуванням тих європейських стандартів, які діють на Україні в якості національних. В Частині 1\* цієї статті викладено загальні положення по УЗ контролю зварних з'єднань, що встановлені стандартом ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010.

В Частині 2 приведено особливості УЗ контролю стикових, таврових та напусккових зварних з'єднань,

що стосуються вибору схем і параметрів контролю для різних категорій і товщин зварних з'єднань.

**Вимоги до виконання УЗ контролю різних типів зварних з'єднань.** Вимоги до виконання УЗ контролю різних типів зварних з'єднань першої та другої категорії викладені:

- у табл. 5 та на рис. 6 для стикового з'єднання;
- у табл. 6 та на рис. 7 для таврового з'єднання;
- у табл. 7 та на рис. 8 для кутового з'єднання;
- у табл. 8 та на рис. 9 для напусккового з'єднання.

**Таблиця 5. Стикове зварне з'єднання**

Категорія зварного з'єднання	Найменша товщина основного матеріалу, мм	L-сканування		N-сканування	Загальна кількість сканувань одним перетворювачем
		кількість перетворювачів з різними кутами вводу	поверхня вводу згідно рис. 6	поверхня вводу згідно рис. 6	
1	$8 \leq t < 15$	1	$P_1$ та $P_2$ або $P_3$ та $P_4$	-	2
	$15 \leq t < 40$	1	$P_1$ та $P_2$ або $P_3$ та $P_4$	-	2
	$40 \leq t \leq 100$	2	$P_1$ та $P_2$ або $P_3$ та $P_4$	-	4
2	$8 \leq t < 15$	1	$P_1$ та $P_2$ або $P_3$ та $P_4$	-	2
	$15 \leq t < 40$	1	$P_1$ та $P_2$ або $P_3$ та $P_4$	-	2
	$40 \leq t \leq 100$	1	$P_1$ та $P_2$ або $P_3$ та $P_4$	-	2

\* Ю. В. Радиш, В. О. Цечаль, А. С. Кірєєв, І. Я. Шевченко, В. Г. Радько. До питання гармонізації Стандарту ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010. Настава з ультразвукового контролю зварних з'єднань металевих конструкцій. Частина 1. — Техн. діагностика і неінеруш. контроль.— 2012.— №1. — С. 53–58.

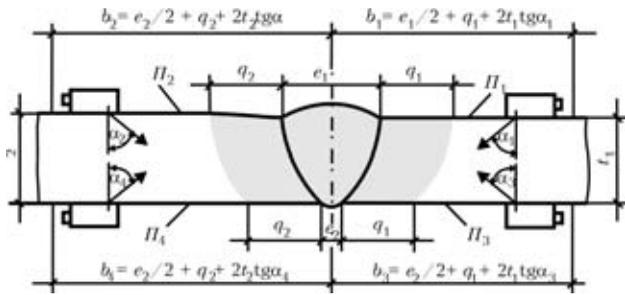


Рис. 6. Стыкове зварне з'єднання:  $b_1 - b_4$  — ширина зони L-сканування прямим та відбитим променем відповідно на поверхнях вводу  $\Pi_1 - \Pi_4$ ;  $\Pi_1 - b_1 = e_1/2 + q_1 + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$ ;  $\Pi_2 - b_2 = e_1/2 + q_2 + 2t_2 \operatorname{tg} \alpha_2$ ;  $\Pi_3 - b_3 = e_2/2 + q_1 + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_3$ ;  $\Pi_4 - b_4 = e_2/2 + q_2 + 2t_2 \operatorname{tg} \alpha_4$

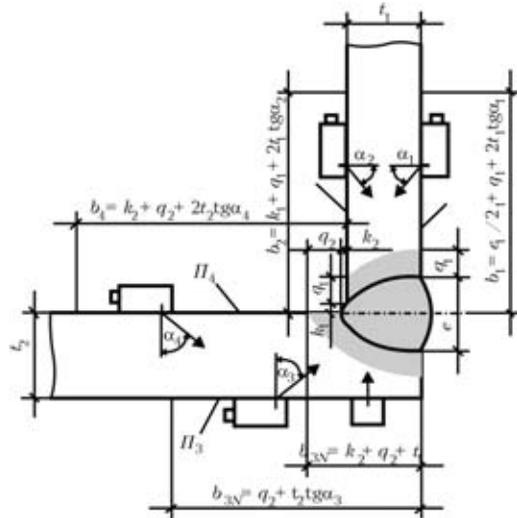


Рис. 8. Кутове зварне з'єднання:  $\Pi_1 - b_1 = e_1/2 + q_1 + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$ ;  $\Pi_2 - b_2 = k_1 + q_1 + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_2$ ;  $\Pi_3 - b_{3L} = q_2 + t_2 \operatorname{tg} \alpha_3$ ;  $\Pi_4 - b_4 = k_2 + q_2 + 2t_2 \operatorname{tg} \alpha_4$ ; — ширина зони L-сканування прямим та відбитим променем;  $\Pi_3 - b_{3N} = k_2 + q_2 + t_1$  — ширина зони N-сканування на поверхні вводу  $\Pi_3$

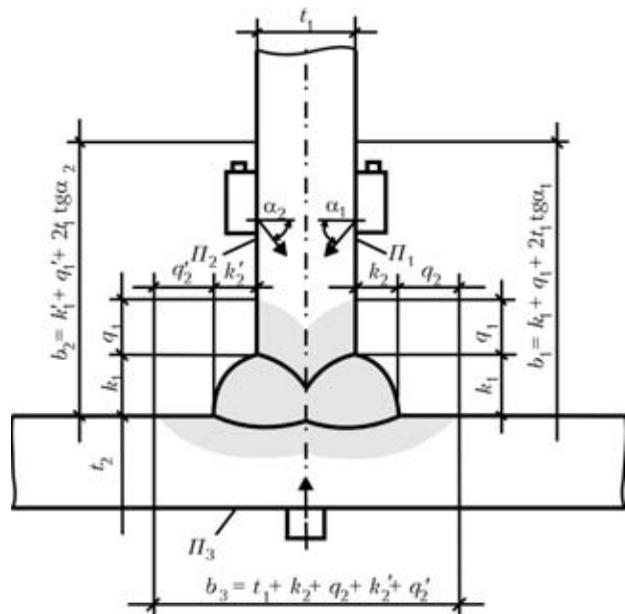


Рис. 7. Таврове зварне з'єднання:  $\Pi_1 - b_1 = k_1 + q_1 + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$ ;  $\Pi_2 - b_2 = k_1' + q_1' + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_2$  — ширина зони L-сканування прямим та відбитим променем;  $\Pi_3 - b_3 = t_1 + k_2 + q_2 + k_2' + q_2'$  — ширина зони N-сканування на поверхні вводу  $\Pi_3$

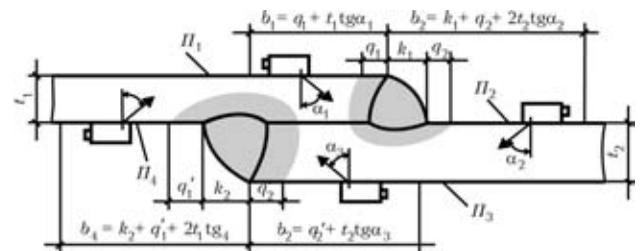


Рис. 9. Напускове зварне з'єднання:  $\Pi_1 - b_1 = q_1 + t_1 \operatorname{tg} \alpha_1$ ;  $\Pi_3 - b_3 = q_2' + t_2 \operatorname{tg} \alpha_3$  — ширина зони L-сканування прямим променем;  $\Pi_2 - b_2 = k_1 + q_2 + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_2$ ;  $\Pi_4 - b_4 = k_2 + q_1' + 2t_1 \operatorname{tg} \alpha_4$  — ширина зони L-сканування відбитим променем ( $\Pi_1 - \Pi_4, b_1 - b_4$  на рис. 7-9 ті, що і на рис. 6)

Таблиця 6. Таврове зварне з'єднання

Категорія зварного з'єднання	Найменша товщина основного матеріалу, мм	L-сканування		N-сканування	Загальна кількість сканувань одним перетворювачем
		кількість перетворювачів з різними кутами вводу	поверхня вводу згідно рис. 7	поверхня вводу згідно рис. 7	
1	$8 \leq t < 15$	1	$\Pi_1$ або $\Pi_2$	$\Pi_3$	1
	$15 \leq t < 40$	1	$\Pi_1$ та $\Pi_2$	$\Pi_3$	3
	$40 \leq t \leq 100$	2	$\Pi_1$ та $\Pi_2$	$\Pi_3$	5
2	$8 \leq t < 15$	1	$\Pi_1$ або $\Pi_2$	-	1
	$15 \leq t < 40$	1	$\Pi_1$ або $\Pi_2$	$\Pi_3$	2
	$40 \leq t \leq 100$	1	$\Pi_1$ та $\Pi_2$	$\Pi_3$	3

Таблица 7. Кутове зварне з'єднання

Категорія зварного з'єднання	Найменша товщина основного матеріалу, мм	L-сканування		N-сканування	Загальна кількість сканувань одним перетворювачем
		кількість перетворювачів з різними кутами вводу	поверхня вводу згідно рис. 8	поверхня вводу згідно рис. 8	
1	$8 \leq t < 15$	1	$П_1$ або $П_2$ або $П_3$ або $П_4$	-	1
	$15 \leq t < 40$	2	$П_1$ або $П_2$ або $П_3$ або $П_4$	$П_3$	3
	$40 \leq t \leq 100$	2	$(П_1$ або $П_2)$ та $(П_3$ або $П_4)$	$П_3$	5
2	$8 \leq t < 15$	1	$П_1$ або $П_2$ або $П_3$ або $П_4$	-	1
	$15 \leq t < 40$	1	$П_1$ або $П_2$ або $П_3$ або $П_4$	$П_3$	2
	$40 \leq t \leq 100$	1	$(П_1$ або $П_2)$ та $(П_3$ або $П_4)$	$П_3$	3

Таблица 8. Напускове зварне з'єднання

Категорія зварного з'єднання	Найменша товщина основного матеріалу, мм	L-сканування		N-сканування	Загальна кількість сканувань одним перетворювачем
		кількість перетворювачів з різними кутами вводу	поверхня вводу згідно рис. 8	поверхня вводу згідно рис. 8	
1	$8 \leq t < 15$	1	$(П_1$ або $П_2)$ та $(П_3$ або $П_4)$	-	2
	$15 \leq t < 40$	1	$П_1$ та $П_2$ та $П_3$ та $П_4$	-	4
	$40 \leq t \leq 100$	2	$П_1$ та $П_2$ та $П_3$ та $П_4$	-	8
2	$8 \leq t < 15$	1	$(П_1$ або $П_2)$ та $(П_3$ або $П_4)$	-	2
	$15 \leq t < 40$	1	$(П_1$ або $П_2)$ та $(П_3$ або $П_4)$	-	2
	$40 \leq t \leq 100$	1	$(П_1$ або $П_2)$ та $(П_3$ або $П_4)$	-	2

Встановлено норми якості проконтрольованих зварних з'єднань в залежності від їх категорій.

Норми оцінки якості приведені у відповідності з європейськими стандартами.

**Висновки**

Розроблені групи придатності до УЗ контролю зварних з'єднань металевих конструкцій та кате-

горії зварних з'єднань в залежності від умов експлуатації та рівня їх відповідальності в конструкції. З урахуванням цього визначені способи ручного УЗ контролю зварних з'єднань та обумовлені численні значення параметрів індикації несучильностей, що реєструються.

Надійшла до редакції  
20.09.2011

**ПОДПИСКА — 2013**  
**на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»**

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

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



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

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

**Контакты:**

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

Подписано к печати 03.08.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклеек.  
Печать ООО «Фирма «Эссе».  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.



# ОБЗОРНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ДЕТАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТИЗА УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛА БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ И КОНСТРУКЦИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМ КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ\*.

Г.Я. БЕЗЛЮДЬКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, О.П. ЗАВАЛЬНЮК<sup>2</sup>, В.Б. НЕСТЕРЕНКО<sup>2</sup>,  
А.Ю. МАРЧЕНКО<sup>1</sup>, Р.Н. СОЛОМАХА<sup>1</sup>, инженеры

(<sup>1</sup>)ООО «Фирма «Специальные Научные Разработки», г. Харьков, (<sup>2</sup>)Херсонский государственный морской ин-т)

*Экспертиза металла крупногабаритных конструкций и сооружений тем точнее, чем больше физически разнородных и информационно эффективных НК-методов и подходов в ней используются. Однако их количество и разновидности в таком экспертном наборе не должны формироваться субъективно и стихийно. Желателен некий объективный оптимизирующий «стержень» для достижения наибольшей полноты решения поставленной задачи и при этом, по возможности, с минимизацией затрат. Роль такого оптимизатора, который к тому же хорошо обобщает и гармонизирует результаты специализированных методов, органично присущ методу коэрцитивной силы. Он продуктивен и как обзорный, и локально, во взаимосвязи общего и частного. И основывается на количественной, качественной и метрологически проверяемой оценке степени усталости металла как самой общей платформе процессов деградации металла в их многообразии.*

*Examination of metal of large-sized structures and constructions is the more accurate, the greater the number of physically dissimilar and information-effective NDT methods and approaches are used in it. However, their number and variety in such an expert set should not be formed in a subjective and spontaneous manner. It is desirable to have some objective optimizing "core" to achieve the utmost completeness of solution of the designed task, while minimizing the costs as far as possible. The role of such an optimizer, which also successfully generalizes and harmonizes the results of specialized method, is inherent to the coercive force method. It is productive both as a survey method, and locally, in the interconnection of the general and the particular. Moreover, it is based on the quantitative, qualitative and metrologically checked degree of metal fatigue as the most general platform of the processes of metal degradation in all their diversity.*

Если представить себе обобщенный образ идеального метода НК для оценки состояния такого (и не только) класса объектов, то, руководствуясь простой инженерной логикой, можем получить следующее. Метод должен быть прост в плане необходимой квалификации исполнителей, нетрудоемок в реализации, убедительно произрастать из классических представлений механики нагружения, наглядно отображать как общую картину нагружения и усталостной деградации металла всего сооружения в целом, так и любых его жизненно важных частей, с выделением зон концентрации напряжений и сопутствующих эксплуатационных воздействий, показывать общие и локальные особенности в их взаимной связи. Причем, слежение должно быть действительно, начиная с состояния поставки (монтажа) и до конца срока службы. С количественными оценочными критериями на всю конструкцию и на каждую зону концентрации, каждое проблемное сварное соединение, с определением скорости накопления деградации, т.е. с прогнозом остаточного ресурса «по состоянию». Добавим сюда пожелание хорошей чувствительности информационного параметра, его однозначность и устойчивость к мешающим факторам. Конечно же этот метод не должен быть только еще одной, пусть и эффективной, но узкоспециальной добавкой в арсенале НК-специалиста. Он должен быть преимущественно эффективен как обзорный, значим организующе-указующе. И при этом его добавление не должно удорожать экспертизу. Напротив, его простота и комплексная физическая эффективность исключают из конкретного обследования методы явно непродуктивные, а продуктивные будут использованы только там, где это диктует состоя-

ние металла. В итоге объемы диагностических работ снизятся, а их достоверность возрастет. Метод должен быть работоспособен в реальных условиях эксплуатации, т.е. в пределах здоровой логики обходиться без зачистки металла, работать по защитному красочному и другому покрытию в несколько мм, не требовать остановки оборудования, функционировать на горячих поверхностях и на любом морозе, отличаться хорошей воспроизводимостью, просто и надежно документироваться, реализовываться в ручном и стационарном вариантах мониторинга и др.

И чем дольше мы занимаемся диагностикой металлоконструкций и оборудования, а также приборостроением для этого, тем бесповоротнее убеждаемся, что такой неправдоподобный набор достоинств сегодня существует и присущ известному более 100 лет методу коэрцитивной силы (МКС). Но не в его изначальном классическом магнитометрическом и металлургическом наполнении [1, 4], а при оценке эксплуатационных изменений в металле в процессе деградации по усталостному типу, т.е. совокупности изменений свойств металла из-за напряжений, температуры, давления, коррозии, воздействия агрессивных сред, радиационного облучения и т.д. Понятно, что информационный параметр контроля, используемый в этом подходе – это коэрцитивная сила металла  $H_c$ . К примеру, ее величина, как отмечалось в [5], возрастает на 300...400 % для ферромагнитных конструкционных марок сталей широкого применения, когда металл в режиме *малоциклового усталости* и статического-квазистатического нагружения накапливает необратимую микроповрежден-

\* Статья на правах рекламы



ность, начиная от исходного состояния до предразрушения [2, 3]. И эту накапливающуюся поврежденность металла сегодня невозможно отследить в массовой практической экспертизе ничем, кроме МКС. Возможные оппоненты, настаивающие на использовании в такой роли иных методов, в лучшем случае неискренни. Им, как специалистам, лучше нас всех понятна несостоятельность этих методов для отмеченных выше задач, особенно в обзорно-обобщающем аспекте. И такая полезная дискуссия продуктивна вне рамок этой статьи.

Как авторы такого нового применения давно известного метода для оценки именно усталостных аспектов состояния металла, мы шли к пониманию и констатации этого около 30 лет. Здесь остались неясности и сегодня, но, пожалуй, только на уровне представлений философии познания и фундаментальной науки на стыке механики разрушения, магнетизма и общих аспектов физики твердого тела. На прикладном уровне все проверено, методически выстроено, готово к практическому применению и успешно работает в массовой экспертизе. Производится линейка хорошо испытанных, приспособленных и метрологически упорядоченных приборов. По мере накопления опыта экспертизы новых разновидностей объектов формируются соответствующие методики или дополнения к ним. Ведется обучение персонала в учебном центре. Факторы, сдерживающие применение МКС в практической диагностике, исключительно субъективны. Отмечено, что чем больше его организующая и направляющая доля в экспертизе данного объекта, тем выше ее техническая и экономическая эффективность. Достаточно подробно прикладные аспекты механики разрушения в таком пока непривычном коэрцитиметрическом ракурсе показаны ранее в работах [5]. Не углубляясь здесь в физические основы «усталостного» применения МКС, остановимся на его заявленной общей и частной приоритетностях.

Как пример, ниже даны фрагменты нашей [6] коэрцитиметрической экспертизы регенератора установки каталитического крекинга для производства бензина на нефтеперерабатывающем предприятии. Аппарат отработал расчетный срок службы (20 лет). Необходима была оценка его состояния перед выводом на капитальный ремонт, с обоснованием его необходимости и уточнением его объемов.

Объект контроля представляет собой технологическую колонну (рис. 1) высотой около 50 м и диаметром 9...11 м (рис. 2). Оболочка сварена из листов стали 09Г2С высокотемпературного варианта, толщиной 20...30 мм. Рабочая температура наружной поверхности металла около 200 °С, температура рабочей среды 700 °С, внутреннее давление  $2 \cdot 10^4$  МПа. Измерения информационного параметра – коэрцитивной силы металла – выполнялись нами вручную, двумя бригадами по два со-

трудника в течение рабочей недели в летний период при полном световом рабочем дне непосредственно на работающем оборудовании, без какой-либо специальной подготовки металла. Для получения достоверного представления о состоянии металла потребовалось выполнить измерения в около 1,2 тыс. точек.

Схематически на рис. 2 показана колонна с обозначением полистного раскроя оболочки. Понятно, что ее состояние в первую очередь определяется состоянием кольцевых сварных соединений на соответствующих уровнях конструкции колонны, обозначенных на рис. 2 номерами поясов колонны, от третьего по 12.

Коэрцитиметрия этих кольцевых соединений была частью общих измерений листов оболочки корпуса соответствующих поясов колонны, как это видно на фрагменте общей развертки листов оболочки на рис. 3.

Здесь показана часть полистной развертки корпуса для поясов № 3–6 с нанесенными на нее в цвете результатами коэрцитиметрии металла листов. На цветной оценочной шкале (рис. 3) синим цветом показано коэрцитиметрически исходное состояние (поставки)  $Hc_0$  для стали 09Г2С, около 2,4 А/см в соответствующих единицах измерения коэрцитивной силы, а ее состояние на пределе прочности  $Hc^B \approx 9$  А/см. Эти границы эксплуатационного состояния металла показаны и на графиках рис. 2, о чем речь идет ниже. При этом на рис. 3 на среднем (центральном) листе четвертого пояса, как методический пример, отмечено минимально необходимое количество точек выполнения замеров вообще на каждом листе и на листах, к нему прилегающих, чтобы получить адекватное представление о напряженном и усталостном состоянии этого листа как элемента конструкции. Обмеряя подобным образом каждый лист оболочки, получаем совокупность измерений по поверхности оболочки. Она характеризует количественно и качественно напряженное и усталостное состояние всей колонны в целом и каждого листа, и сварного соединения – в отдельности, но все это во взаимной системной связи. Эта особенность составляет главное достоинство и основное содержание МКС применительно к экспертизе крупногабаритных объектов из металла, имеющее исключительный характер. Из него уже естественно следует целый набор еще более безусловно эффективных прикладных частных, которые аксиоматически актуальны, но до сих пор относились к ряду благих пожеланий из-за отсутствия механизма их осуществления. Не будет лишним отметить очевидную истину, что интегральная оценка состояния объекта, особенно в том, что касается общего усталостного и напряженного состояния, его механическая устойчивость потенциально не «по силам» ни одному НК-методу или их совокупности (кроме



МКС, конечно) и даже никакой концепции экспертизы, если иметь в виду уровень массовой экспертизы. Хотя саяно-шусшенская и фукусимская аварии более чем наглядно свидетельствуют, что и на уникальных объектах с состоятельной комплексной технической диагностикой далеко не благополучно. В основной массе экспертиза всех уровней привычно констатирует «дефектность – не дефектность» металла какой-то области обследуемого объекта и, как правило, вне логической связи с его рабочей пред- историей и без внятного прослеживания влияния этой дефектности на работоспособность целостной конструкции сейчас и в будущем. Понимание возможной неработоспособности условно бездефектного металла реально не присутствует в практической экспертизе даже концептуально. Не говоря уже ни о какой содержательной ориентированности на предупреждение разрушения металла. А о сравнительной экономической и технической эффективности вариантов решений столь актуальной задачи – отремонтировать имеющееся оборудование или покупать новое – так и речь не может идти без целостного видения механической устойчивости объекта, степени и скорости накопления усталостной микроповрежденности металла в нем. Некогда эффективный дефектоскопический акцент, главенствующий в практической диагностике металлов, сегодня, по-видимому, исчерпал свою продуктивность и не может обеспечить реальную, а не абстрактную нормативную безопасность работы оборудования в любых отраслях.

Из графиков на рис. 2 видно, какая часть оболочки сооружения осталась по состоянию металла практически в исходном состоянии, а какая заметно продвинулась в накопленной поврежденности металла. При этом графики средних поуровневых значений и максимальных практически идентичны по характеру, что является свидетельством неслучайности каждого из них и отображаемых ими физических тенденций в контролируемом коэрцитиметрическом методе металле.

На рис. 4 показан уже подробно пример коэрцитиметрической экспертизы состояния одного из кольцевых сварных соединений колонны между 9 и 8 поясами. Это радиальный график распределения значений  $H_c$  по длине окружности этого шва. Используемое здесь обозначение СКО – это среднеквадратическое отклонение, характеризующее степень неравномерности накопления необратимых изменений металла сварного соединения. Выполнены измерения в обеих околошовных зонах как наиболее вероятных областях начала разрушения металла, обычно наступающего при значениях  $H_c$ , приближающихся к границе  $H_c^B$ , т.е. около 9 А/см. Визуально на этом шве имеется наибольшее количество былых ремонтных вставок из-за поверхностного растрескивания металла в зонах, где, свидетельствуя это, образовались и совпадают

максимумы  $H_c$  выше и ниже шва, как это показано метками  $A$  и  $B$  на рис. 4. У других кольцевых сварных соединений, имеющих и более высокие значения  $H_c$  в своих зонах термовлияния, но только с одной стороны шва, трещинообразования за 20 лет не было. Из всего этого следуют важные для службы эксплуатации выводы. В целом у всех кольцевых сварных соединений колонны металл в наиболее подверженных разрушению зонах термовлияния находится в состоянии надежной эксплуатации и не нуждается в замене, упрочнении и даже дефектоскопии. Растрескивания металла имели место в зонах, где с обеих сторон шва величина  $H_c$  одновременно имеет сегодня значения более 5 А/см. Рабочий режим эксплуатации колонны не может инициировать напряжения в этих сварных соединениях, способные вызвать растрескивания металла в зонах термовлияния. Причина этого явления – неплановые остановки – пуски технологической установки, при которых возникают кратковременные локальные механические перенапряжения температурного происхождения. В такие переходные моменты в хорошо видимых коэрцитиметрией зонах возникают пиковые механические перенапряжения, «разряжающиеся» трещинами металла. Это трещины не усталости, а напряжений. Рекомендации в этой части экспертизы состоят в минимизации остановок в работе колонны, а если они все же случаются, то надо хотя бы режим пускового разогрева (из холодного состояния) не форсировать во времени для минимизации температурных напряжений в металле. Особенно «травматичны» в этом плане остановки работы колонны в зимнее время, т.е. при отрицательных температурах окружающего ее воздуха, порядка минус 20 °С и ниже. Ударная вязкость даже новой стали



Рис. 1. Общий вид контролируемого объекта



09Г2С при таких температурах уже заметно ухудшается. А с учетом уровня накопленной (за 20 лет) поврежденности, который в зонах концентрации этих процессов достигает 40...60 % по измерениям  $H_c$ , получаем, что те температурные напряжения, которые в летнее время данный металл мог бы выдержать без последствий, в зимнее время приводят к растрескиванию оболочки корпуса колонны. Несомненно, это недостаток конструкции, который исправить на данном аппарате в рамках разумно достаточного финансирования практически невозможно. Скомпенсировать в какой-то мере возможно, понимая с помощью МКС суть проблемы. Эффективно здесь может оказаться усиление металла уже обозначившихся зон концентрации напряжений, но не традиционными ремонтными вставками, а специальными накладками с так называемыми в сварке электрозаклепками, не травмирующими собственно корпус колонны, а толь-

ко упрочняющих его именно по всей поверхности таких накладок, в четко очерченных с помощью МКС локальных зонах. Все выявленные зоны концентрации необратимых ухудшений свойств металла не связаны с нормативным режимом работы колонны. Об этом убедительно свидетельствуют и средние арифметические значения величины коэрцитивной силы каждого кольцевого сварного соединения (СА), рис. 2, и наибольшие значения  $H_{c_{max}}$ , выявленные в каждом соединении. Как видно из рис. 2, полученные на всей этой колонне значения  $H_{c_{средн}} = CA$  и  $H_{c_{max}}$  далеки от границы начала разрушения металла  $H_c^B \approx 9$  А/см. Причины имевших место растрескиваний металла в течение срока службы регенератора – не эксплуатационная усталость металла, а кратковременные температурные перегрузки в отдельных зонах из-за технологических сбоев в работе. Состояние всех вертикальных сварных соединений из опы-

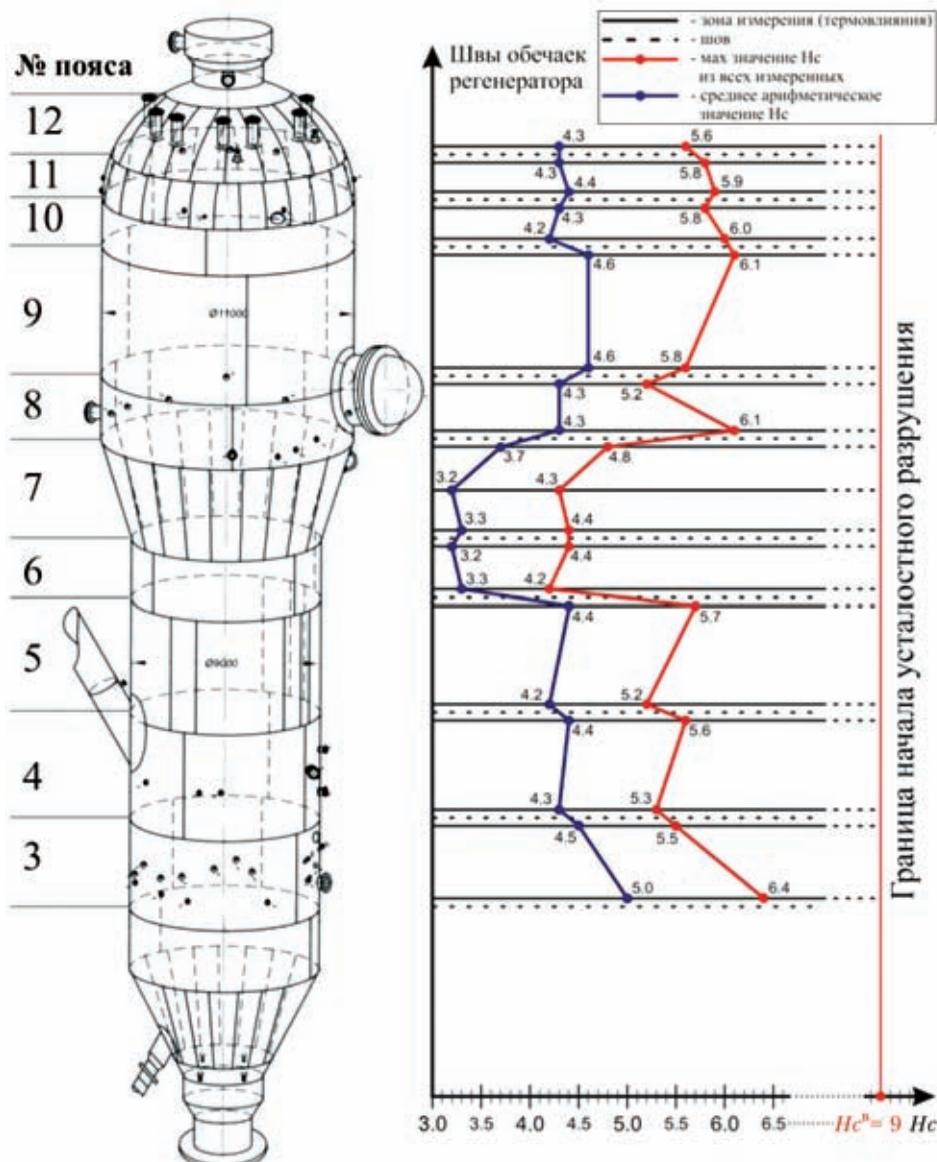


Рис. 2. Схематическое изображение колонны с графиками средних и максимальных значений коэрцитивной силы  $H_c^B$  относительно допустимого состояния для стали 09Г2С в кольцевых сварных соединениях



та эксплуатации и из результатов коэрцитиметрии полностью работоспособное. Как показано далее, самое слабое место оболочки колонны по уровню накопленных за 20 лет необратимых именно усталостных изменений в металле имеет более, чем 30 % запас по остаточному ресурсу в коэрцитиметрическом видении.

Как видно из рис. 3 и 4, подобных выводов по состоянию как сварного соединения, так и основного металла на основе любого другого традиционного метода НК или их совокупности сегодня получить невозможно. Наглядно показано, где «плохо» и насколько, а также очерчены границы таких зон. Из этого также наглядно и документируемо (!) видно, где и примерно когда (по усредненной скорости роста уже накопленной необратимой деградации металла), следует ожидать перехода в состояние начала именно усталостного разрушения металла. А если рассмотреть целостную развертку оболочки колонны, коэрцитиметрия выявила сформировавшуюся односторонне выраженную несбалансированность по одной из образующих (по высоте колонны) на всех уровнях. Эту пока неопасную, но уже тенденцию в состоянии всей колонны МКС показывает количественно и качественно, однако в рамках журнальной страницы это изобразить затруднительно.

В целом, как отмечалось, на поверхности колонны выполнено коэрцитиметрических замеров примерно в 1,2 тыс. точках. Среднее ариф-

метическое этого множества,  $CA = 4,07$ . Наибольшее значение  $Hc_{max}$ , выявленное на этом объекте, оказалось равным 6,4 А/см. Это самое «слабое звено» оболочки по остаточному ресурсу. Если принять во внимание, что исходное состояние (поставки) для этой стали  $Hc_0 \approx 2,5$  А/см, и что к величине  $Hc_{max}$  содержащая это значение зона пришла за  $T$  лет службы, то средняя скорость накопления деградации металла колонны в сложившемся режиме ее работы и по самой плохой области составила  $\Delta Hc = (Hc_{max} - Hc_0) / T = V = 0,22$  А/см/год. Зная, что для этой стали гранично допустимое значение  $Hc^B = 9$  А/см и в предположении линейного характера накопления поврежденности металла в течение срока службы, получаем оценку остаточного ресурса оболочки корпуса колонны опять же по ее наиболее развитой зоне концентрации усталости металла, как  $(Hc^B - Hc_{max}) / V = 12$  лет при условии сохранения сложившегося режима ее нагружения. Если выполнить упреждающий упрочняющий ремонт этой и близких к ней по накоплению усталости зон, прогноз ресурса заметно и обоснованно улучшается. Таким образом, МКС делает ремонт оборудования целевым, обоснованным осмысленным действием, а не рутинной строкой в плане мероприятий, эффективность которого непросто проверить. Т.е. МКС не только позволяет реализовать усталостное слежение всего сооружения в целом и его (им же указанных) самых проблемных областей, но делает это с количественной оценкой степени и ско-

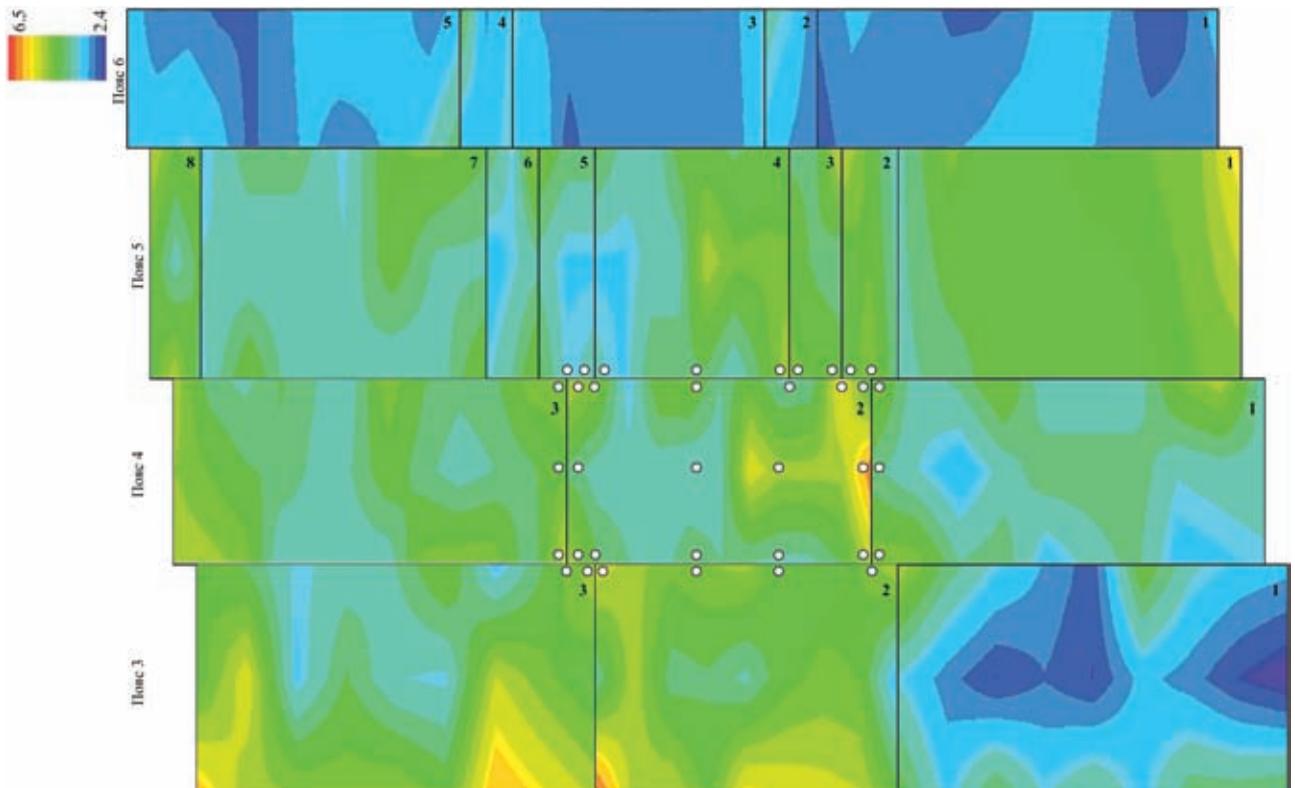


Рис. 3. Фрагмент полистной и поуровневой развертки состояния сварных соединений и основного металла оболочки колонны с типовой схемой контроля каждого листа

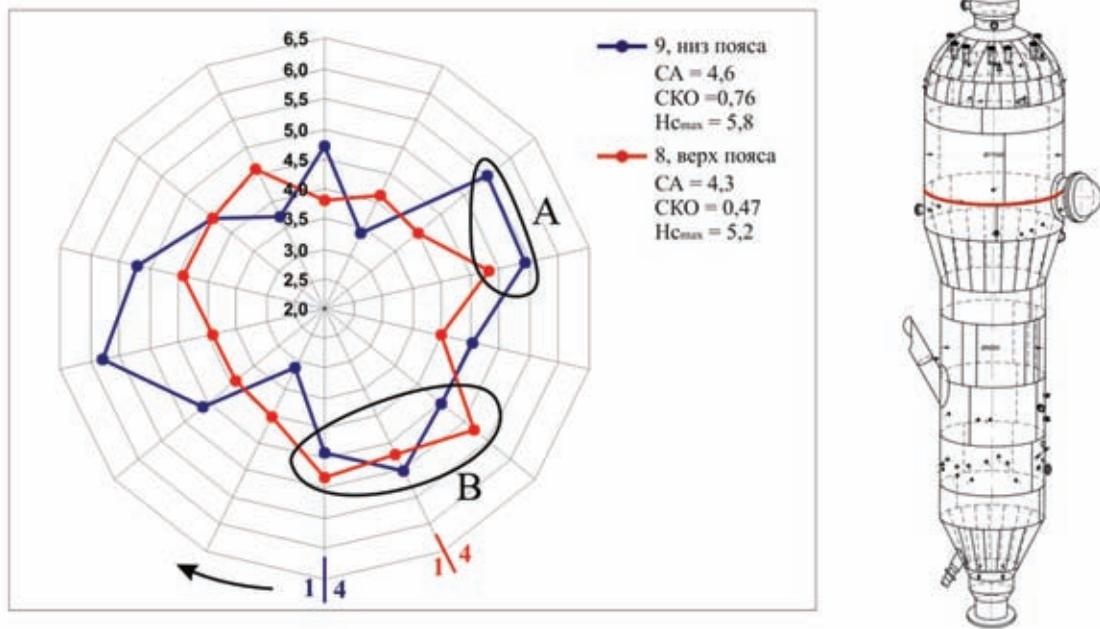


Рис. 4. Кольцевое сварное соединение поясов 8 и 9, усталостное состояние по измерениям коэрцитивной силы в околошовных зонах.

рости деградации. В свою очередь, оценка остаточного ресурса при этом является физически обоснованной, исходя из реального состояния металла и коэрцитиметрических границ допустимого состояния для каждой марки стали, когда начинается разрушение уже на макроуровне.

Таким образом, коэрцитиметрия в представленном виде (см. рис. 2) отображает общую нагруженность, степень накопленной необратимой усталостной поврежденности и механическую сбалансированность всего сооружения. При наличии глобальных тенденций к формированию и развитию неустойчивости, неуравновешенности, их хорошо видно на коэрцитиметрии развертки всей оболочки корпуса. В таком виде также четко локализуются уже периферийные зоны концентрации факторов деградации с указанием ее степени развития и границ каждой зоны. По такому варианту отображения результатов МКС (см. рис. 3) нетрудно увидеть, где общее состояние конструкции инициирует появление и развитие периферийных локальных зон концентрации. И, напротив, где ослабление локальной зоны ведет к ослаблению всего сооружения. Дополняя это вариантами отображения результатов коэрцитиметрического обследования, как на рис. 4 (а таким вариантам в каждой конкретной экспертизе при творческом отношении к делу – нет числа), имеем исключительную информацию для содержательного технического аудита объекта при выборе лучшей стратегии по текущему состоянию – менять или ремонтировать, – потому что хорошо видна общая степень изношенности металла, наиболее продвину-

тые в этом плане зоны, их границы, степень усталости металла в них.

Здесь может быть полезно обобщенное представление текущего значения величины  $Hc$  как совокупности трех компонент:

$$Hc^{\text{текущ.}} = Hc^0 + \Delta Hc^{\text{уст.}} + \Delta Hc^{\text{напряж.}} \quad (1)$$

Составляющая  $Hc_0$  определяется химсоставом и процессом производства металла как такового. Вторая составляющая появляется и накапливается при появлении необратимых изменений по усталостному типу. Третья компонента – при наличии обратимых (упругих) напряжений любого рода. Понятно, что с ростом срока службы (и особенно в зонах концентрации напряжений) составляющая  $\Delta Hc^{\text{уст.}}$ , возникнув, непрерывно растет. Для режима надежной эксплуатации должно выполняться неравенство  $Hc^{\text{текущ.}} < Hc^B$ . Из этого выражения и из (1) очевидно, почему по мере накопления усталостных изменений в зоне концентрации напряжений металл начинает разрушаться при напряжениях в нем заметно меньших величины его справочного предела прочности  $\sigma^B$ . Это становится возможным как раз из-за ухудшения механических свойств при развитии деградации по усталостному типу, причем зачастую в бездефектном для дефектоскопии металла. Не отрываясь от первичности физики, математически это хорошо видно из совместного анализа этого неравенства и выражения (1): по мере необратимого роста усталостной составляющей  $\Delta Hc^{\text{уст.}}$  на фоне неизменной природной составляющей  $Hc_0$  область определения составляющей  $\Delta Hc^{\text{напряж.}}$  неуклонно сокращается и как раз по верхней границе.



Все наши приведенные утверждения и предположения относительно МКС не декларативны. Их легко проверить каждому, выполнив стендовые испытания образцов на малоцикловую усталость или, еще проще, на растяжение до разрушения с параллельным измерением величины коэрцитивной силы металла. Измерения на реальном оборудовании будут еще убедительнее из-за отсутствия масштабного фактора.

Реальная картина состояния металла не всегда так благополучна, как на демонстрируемом здесь регенераторе. В одной из наших статей [5] подробно показаны результаты коэрцитиметрии воздухонагревателей доменной печи (рис. 5). Коэрцитиметрическая оценка состояния куполов этих воздухонагревателей доменной печи после взрыва одного из них четко показала очевидный недостаток конструкции как причину аварии. Области металла куполов, находящиеся в состоянии предразрушения, были выявлены и оперативно заменены. Неизбежная многолетняя остановка работы доменной печи этим предотвращена. Тот же металл, 09Г2С, но уже в стадии предразрушения в ло-

кальных зонах, никем и никак сегодня не диагностируемой. Без преувеличения, тогда наша МКС-экспертиза предотвратила неизбежное разрушение и, как следствие, многолетний простой доменной печи. Целевой ремонт аварийных зон (из-за явного недостатка конструкции) позволил бесперебойную работу печи уже в течение 7 лет, причем сверх расчетного ресурса. При этом даже очередность остановки воздухонагревателей для предупредительного ремонта их куполов была вполне определенной по коэрцитиметрическим показателям деградации их металла по усталостному типу.

На рис. 6 показаны результаты коэрцитиметрии состояния металла внутренней оболочки изотермического хранилища аммиака. Обследованы три нижних пояса (сталь 16ГС), днище (сталь 09Г2С) и так называемый уторный шов (стык днища и боковой стенки).

Состояние этого сосуда, исходя из всего вышесказанного, вполне очевидно удовлетворительное. Видны количественно и качественно зоны опережающего развития усталостной деградации как объект более скрупулезного ана-

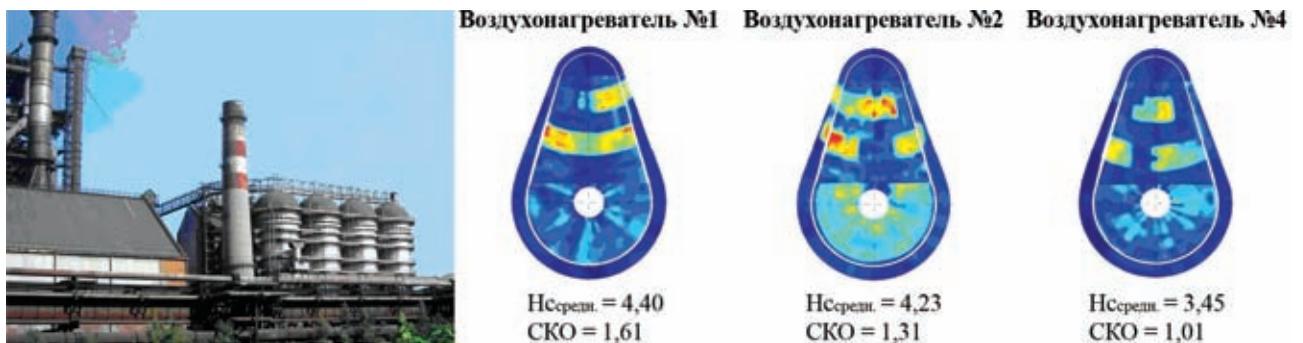


Рис. 5. Результаты коэрцитиметрии воздухонагревателей доменной печи

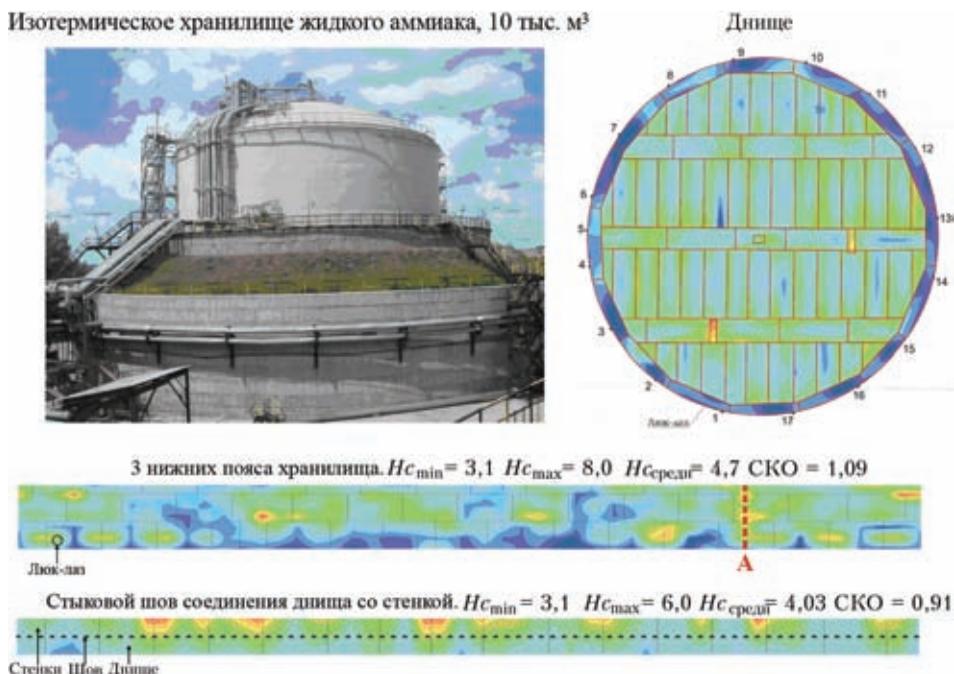


Рис. 6. Результаты коэрцитиметрии металла изотермического хранилища аммиака

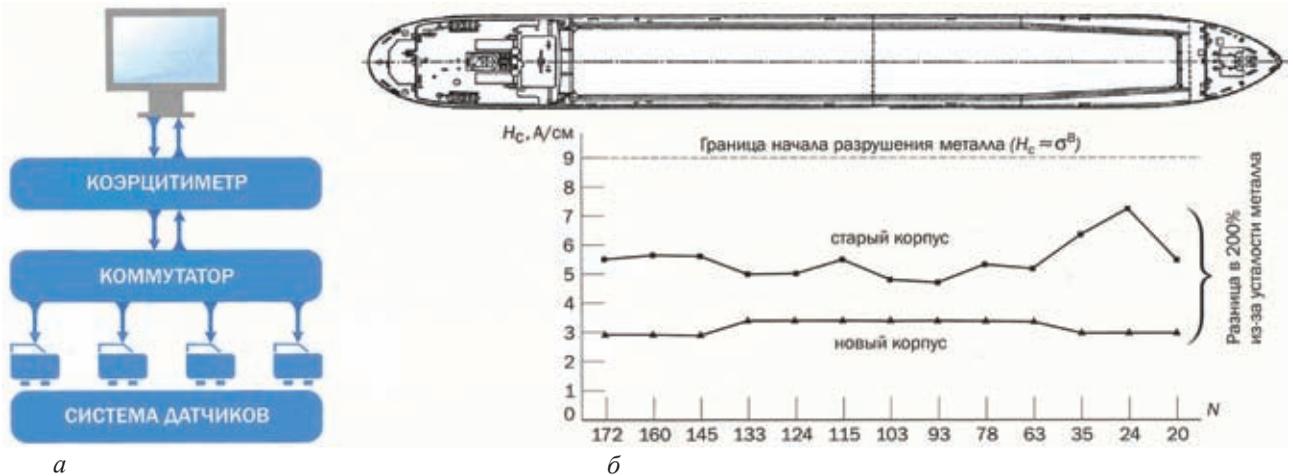


Рис. 7. Коэрцитиметрия больших объектов системами автоматического мониторинга (а) и результаты коэрцитиметрического контроля усталостного состояния корпуса в зависимости от срока службы (б)

лиза в последующих экспертизах, с реальной оценкой скорости накопления микрповрежденности. На развертке трех нижних поясов хорошо заметно начало формирования зоны нестабильности по одной из высотных образующих этого сосуда (метка А). Такую наглядную оценку степени накопленной микрповрежденности основного металла и металла сварных соединений в рамках рядовой экспертизы сегодня можно выполнить только этим методом.

Применительно к корпусам морских и речных судов, как, впрочем, и любых больших конструкций, развиваются две разновидности практического выполнения коэрцитиметрического контроля. Одна из них – для периодической общей экспертизы текущего состояния – реализуется вручную портативными приборами с приставным преобразователем-датчиком. Вторая – для непрерывного эксплуатационного мониторинга наиболее выраженных зон концентрации нагрузок – реализуется стационарными или временно размещаемыми системами коэрцитиметрического мониторинга, как это показано на рис. 7, а. Такая система, установленная на корпусе судна любого типа, сможет заметно улучшить его экономические показатели, например, за счет снижения простоев из-за плохой погоды, когда судоводитель, не перестраховываясь, выходит в рейс, имея реальную, текущую и непрерывную информацию о состоянии металла всех главенствующих точек конструкции. Безопасность плавания повы-

шается за счет слежения за реальной нагруженностью корпуса как в плохих погодных условиях, так и при выполнении грузовых и балластных операций. Это направление для подробного показа требует отдельной статьи, а на рис. 7, б показаны результаты более чем очевидные коэрцитиметрического контроля усталостного состояния корпуса в зависимости от срока службы. Вероятность излома корпуса судна любого типа заметно снижается при любых вариантах коэрцитиметрического слежения за его нагруженностью и усталостью [9].

Рис. 8 демонстрирует начало формирования зоны будущего разрушения приводного вала большой мощности. Это может быть отнесено к турбинам и генераторам энергоблоков, судовым гребным валам, а также соответствующим приводам мощных вентиляторов, машин шахтного подъема и т.д. Понятно, что никаким иным методом НК, кроме МКС, такую информацию получить невозможно в рамках рядовой экспертизы. «Красные» зоны на концах вала – это отпечаток технологий локального упрочнения металла.

Отметим также, что для практического подкрепления и так немалых достоинств МКС нами начат выпуск нового прибора – симбиоза, который одним датчиком одновременно с измерениями коэрцитивной силы выполняет в той же точке замеры толщины металла. Причем, опять же без зачистки, на холодном и горячем металле и без контактной жидкости, прямо через защитное покрытие. Беспрецедентно большой объем одновременной и беззатратной (попутной) толщинометрии металла еще более удешевляет диагностику и делает ее точнее не только простым дополнением толщинометрической информацией, но и за счет использования тесной естественной механической связи между величиной коэрцитивной силы и толщиной металла в зонах концентрации напряжений. Эти два параметра, каж-

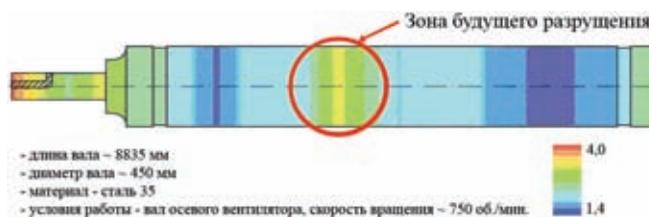


Рис. 8. Коэрцитиметрия наглядно показывает начало формирования зоны будущего разрушения мощного приводного вала, Ст35



дый по-своему, отображают процессы накопления усталости. Их первопричины, как правило, взаимно усугубляют друг друга. Их совместное оценивание делает результирующую оценку состояния металла в  $\sqrt{2}$  раз точнее по ее статистическим представлениям. Или просто повышает безопасность работы контролируемого изделия еще более, чем без такого совместного использования этих двух параметров металла при оценке работоспособности оборудования в процессе срока службы.

Вне всяких сомнений, коэрцитиметрия, как и любой иной метод, не может претендовать абсолютно на лидерские позиции в НК. В первую очередь она дополняет давно сложившуюся систему методов в экспертизе металла до сих пор недоступной информацией об усталости металла с ее количественной и качественной оценкой. Однако там, где ее главенствующая функция является объективной реальностью, продуктивно это использовать. Здесь всегда можно получить значимый прогресс в достоверности, трудоемкости и экономичности комплексной экспертизы в целом. Поделиться этой информацией с экспертным сообществом и представляется нам главной задачей данной публикации.

## Выводы

1. Оценка состояния металла больших конструкций методом коэрцитивной силы в процессе их изготовления, монтажа и эксплуатации открывает новые возможности в их экспертизе и диагностике, недоступные пока в реальной практике обследований, особенно для слежения за усталостью металла, его напряженно-деформированным состоянием. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего сооружения с указанием локальных зон концентрации факторов деградации, с количественным измерением, общим и в каждой из локальных зон, с оценкой скорости накопления и прогнозом остаточного ресурса в части состояния металла.

2. Появляется возможность выполнять ремонт не формально, а предупредительно, по состоянию металла в каждой очерченной коэрцитиметрией зоне, в ее взаимной связи с общим состоянием всего сооружения, а не как отдельно взятой независимой области.

3. Метод не требует специальной подготовки поверхности металла и остановки работы оборудования. Квалификация персонала для выполнения первичных измерений самая невысокая.

4. Метод не удорожает сложившуюся сегодня экспертизу и диагностику, так как более узкие и специальные НК-методы, используя целеуказания МКС, применяют только там и тогда, как этого требует текущее состояние металла конкретной зоны-концентратора. При этом достоверность всей экспертизы улучшается за счет количественной и качественной оценки усталости металла, до сих пор не реализуемой в практике массовой экспертизы.

1. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
2. Захаров В.А., Боровкова М.А., Комаров В.А., Мужижский В.Ф. Влияние внешних напряжений на коэрцитивную силу углеродистых сталей. — Дефектоскопия.— 1992.— №1.— С.41–46.
3. Захаров В.А., Боровкова М.А., Бабкин С.Э. О связи коэрцитивной силы с механическими напряжениями в конструкционных сталях / Неразрушающие физические методы и средства контроля материалов и изделий. Тез. докл. Республ. сов., 25-27 ноября 1981 г. – Ижевск, 1981.— С.62–64.
4. Богачева Н.Д. Применение размагничивания в технике / СПб, ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2010.— 264 с.
5. Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Соломаха Р.Н. Контроль усталости металла неразрушающим магнитным (коэрцитивметрическим) методом как объективная первооснова диагностики оборудования и конструкций // В мире неразруш. контроля.— 2009.— 44, № 2.— С. 26–29.
6. Безлюдько Г.Я., Долбня В.Е., Попов Б.Е., Соломаха Р.Н. Оперативный контроль напряженного и усталостного состояния сварных соединений неразрушающим методом по магнитной характеристике металла – коэрцитивной силе. — Там же.— 2006.— № 1.— С. 58–59.
7. Безлюдько Г.Я., Елкина Е.И., Попов Б.Е. Радикальное улучшение оценки текущего состояния кислородных баллонов применением метода коэрцитивной силы (по результатам исследований 1990–2000 гг.). — Там же.— 2011.— № 3.— С. 34–35.
8. Завальнюк О.П., Нестеренко В.Б. Мониторинг прочности судна как один из путей обеспечения безопасности мореплавания / Техн. диагностика и неразруш. контроль.— 2011.— № 4 —С.53–56.
9. Безлюдько Г.Я. Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы металла // Там же.— 2004.— № 1.— С. 20–22.

Наши контакты:

Тел./факс: (057)771-65-91, 738-32-06

mail@snr-ndt.com

www.snr-ndt.com



## І. П. БІЛОКУРУ – 75



Виповнилося 75 років завідувачому кафедри машинознавства Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, доктору технічних наук, професору, академіку Транспортної академії України **Івану Павловичу Білокуру**.

Спеціалісти знають Івана Павловича як відомого вченого в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики, який більше 50 років життя присвятив науковій, педагогічній роботі та сертифікації персоналу.

Після закінчення в 1967 р. механіко-математичного факультету Київського державного університету імені Тараса Шевченка за спеціальністю «механіка» І. П. Білокур виконував та керував науково-дослідними розробками методів та засобів НК матеріалів, виробів та зварних з'єднань в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, займався організаційно-методичною та викладацькою діяльністю в НТУУ «Київський політехнічний інститут» і Національному авіаційному університеті. Був серед авторів створення вихрострумове дефектоскопу для контролю якості плоскогортальних труб та засобів виявлення розшарувань нормальними хвилями, засобів комплексної дефектоскопії елементів космічних конструкцій, ракетних двигунів, пристроїв безпосереднього перетворення теплової енергії в електричну та багатьох інших розробок в галузі НК.

В 1978 р. очолив лабораторію технічної діагностики УкрНДІпродмаш та провів експлуатаційні спостереження з аналізом даних дифузійних і шнекових апаратів, що експлуатуються на цукрових заводах України та розробив рекомендації по їх діагностуванню та відновленню.

Білокур І. П. приймав активну участь в створенні в Київському політехнічному інституті нової інженерної спеціальності «Фізичні методи контролю». Започаткував і викладав учбову дисципліну «Контроль якос-

ті зварних сполучень». Наукові дослідження стосувались оцінки якості матеріалів та діагностики виробів, моніторингу машин і конструкцій, за які був нагороджений золотою медаллю ВДНГ СРСР.

Високий науковий рівень розробок був підтвержений успішним захистом кандидатської (1975 р.) і докторської (1991 р.) дисертацій. Обраний академіком Транспортної академії України в 1993 р.

З 2000 р. Іван Павлович займає посаду завідувачого кафедрою машинознавства Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету. Значний вклад вніс в організацію нової спеціальності «Якість, стандартизація і сертифікація» та підготовку спеціалістів, створення філіалів кафедри і науково-технологічного центру «Експерт».

За його участю складені нормативно-правові документи сертифікації персоналу по НК і діагностиці об'єктів, підвідомчих Держнагляду України.

Іван Павлович — автор більше ніж 180 наукових праць, в тому числі монографій, підручників, навчальних посібників, термінологічних словників, винаходів. Підготував шість кандидатів наук та одного доктора наук.

Загальновідома плідна громадська діяльність І. П. Білокура як академіка Транспортної академії України, багаторічного члена Українського товариства НКТД, члена Спеціалізованої вченої ради по захисту докторських дисертацій, члена науково-координаційної та експертної Ради з питань ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин при Президії НАН України, керівника експертного центру Укравіатрансу з сертифікації, члена комітетів зі стандартизації.

Активну участь приймає Іван Павлович в роботі та організації міжнародних, республіканських та галузевих конференцій і семінарів.

*Зичимо Вам, шановний Іване Павловичу, особистого щастя, багатирського здоров'я, творчої наснаги і невичерпної енергії для досягнення нових професійних цілей!*

*Редакція журналу «ТДиНК»  
Правління Українського товариства НКТД*



## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ (по материалам 18-й Всемирной конференции по НК)

**В. А. ТРОИЦКИЙ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Мировые тенденции в области НК и ТД были высветлены на 18-й Всемирной конференции 18<sup>th</sup> WCNDT по неразрушающему контролю, которая прошла 16 – 20 апреля 2012 г. в Дурбане (ЮАР). В ее работе приняли участие более 1000 делегатов, которыми были представлены пленарные, обзорные и научные доклады – секционные и стендовые. Проведены специальные сессии и семинары по ряду вопросов, в том числе мониторинг состояния объектов, квалификации и сертификации персонала, неразрушающий контроль в области радиационной защиты. Одновременно с 18<sup>th</sup> WCNDT прошли Генеральная ассамблея ICNDT, заседание ISO TC-135 НК, слушания в Интернациональной академии NDT.

В работе конференции и выставки приняли участие не только компании, но и более тридцати национальных Обществ неразрушающего контроля, в том числе и Украинское общество НКТД. Всего в работе выставки приняли участие более 120 компаний из 43 стран мира. Выставочная площадь, занятая для демонстрации средств НК и ТД, составила 9500 м<sup>2</sup>. За пять дней работы конференции на 52 сессиях были представлены 396 презентаций и 69 стендовых докладов 979 авторов из 49 стран мира. Общее количество посетителей выставки и конференции составило 1452 из 89 стран, что явилось рекордом для международных конференций по НК. На секциях, работавших по методам НК, было заслушано более 300 докладов:

по ультразвуковому контролю – 126 (что составило 46 % общего количества докладов); рентгеновскому – 68; оптическому – 24; вихретоковому – 21; магнитному – 14; тепловизионному – 11.

Ультразвуковые методы преобладают в современных технологиях НК вследствие универсальности их применения для контроля широкого диапазона изделий из материалов с различными физическими свойствами, при мониторинге ответственных объектов и изношенных структур — радиационные, вихретоковые, магнитные и визуально-оптические.

На пленарных заседаниях были заслушаны 5 ключевых лекций и 34 обзорных доклада по актуальным темам мониторинга на основе данных НК. Наибольшую активность проявили американские и европейские компании, преимущественно британские и немецкие.

В своем докладе Р. Cawley, представитель фирмы «Mechanical Engineering», рассказал о развитии систем непрерывного мониторинга, которые приходят на смену традиционным периодическим проверкам объектов для оценки остаточного ресурса, используется анализ напряженно-деформированного состояния. В качестве примера может быть упомянута система gPIMS производства «Guided Ultrasonics Ltd» низкочастотного УЗ контроля протяженных объектов.

О разработке эффективных компьютеризированных программ для экзаменов по сертификации специалистов НК с использованием психометрических принципов и с последующим статистическим анализом результатов полностью соответствующим документам ANSI 17024 и ANSI/ASNT CP-105 рассказал R. Potter из Американского общества НК.

О развитии системы сертификации персонала в английской атомной промышленности за последние 50 лет доложил A. Rogerson из «Serco Inspection Centre» и дал свою оценку ситуации по гармонизации систем подготовки и сертификации персонала НК в различных отраслях промышленности. Также он подчеркнул, что уровень подготовки и правила сертификации специалистов по НК различаются не только в разных странах, но и в разных секторах промышленности одной страны. Это, к сожалению, касается и Украины. Пока что руководство АЭС Украины продолжает проводить сертификацию специалистов по нормативным документам Советского Союза.

Об успехах проекта «To Improve the Global Quality of Life through the Optimum Use of Welding Technology», а также о важности двух ключевых технологий – сварки и НК в жизни 10 млрд человек, населяющих планету Земля, рассказал г-н С. Smallbone, представитель «Welding Technology Institute».

В своем докладе доктор Н. Wiggernhauser из Федерального института исследований и испытательных материалов (Берлин, Германия) отметил, что гражданское строительство представляет собой очень сложную отрасль для НК, так как включает транспорт, дороги, инфраструктуры городов, частные и промышленные здания. Контроль за энергетическими объектами также является неотъемлемой частью весьма интересной и динамичной области, требующей более широкого использования средств и методов НК. В этом случае износ и повреждение мостов, дорог, железных дорог и тун-



нелей не будет непредвиденным образом увеличиваться с течением времени. Основной целью доклада было рассказать об исследовании влияния различных нагрузений на изменение скорости распространения УЗ волн в бетоне и оборудовании, оценке реального ресурса на основе анализа результатов НК. Именно это направление в Украине набирает все большие обороты, в частности, в ИЭС им.Е.О.Патона НАН Украины.

По радиационному контролю наибольший интерес вызвали доклады:

– Выбор цифровых рентгеновских детекторов для НК, обзор технических решений, перспективных и представленных на рынке. — П.Виллемс (BVBA, Stekene, Бельгия);

– Обзор цифровой радиографии на службе безопасности. — Р.Pincu, С.Telesz (Vidisco, Израиль);

– Использование в радиографических системах современных цифровых материалов детекторов (DDAs) для повышения безопасности и скорости сканирования. — J.Gomes (GE Sensing & инспекции, Lewistown, США).

Особый интерес вызвал доклад Z.Prevorovsky «Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy and Acoustic Emission in SHM of Aircrafts», в котором рассмотрены современные перспективные методы нелинейной спектроскопии и акустической эмиссии для использования в диагностике авиационных конструкций. На эту тему также был заслушан доклад Yong-Moo Cheong «Images of Cracks using a Localized Nonlinear Ultrasonic Parameters», в котором утверждалось, что нелинейный акустический эффект является чувствительным инструментом определения микротрещин на ранней стадии образования.

Возможности УЗ метода на основе фазированных антенных решеток применительно к диагностике композитов сложной формы рассмотрены в докладе N.Hankinson «Flexible Phased Array for Inspecting Curved Composites», который подчеркнул важность вопросов методологии проведения контроля сотовых композиционных конструкций.

Тема правильного сочетания методов НК для оптимального решения вопросов качества была развита в ряде докладов. Так, в докладе Pi-Kuan Chen и Kun-Yi Tsa «Using NDT Methods for Inspection Work Rolls» подчеркивалось, что внутренние и поверхностные дефекты в прокатных валах выявляются с разной степенью эффективности при контроле различными методами. Поэтому авторы в критических случаях использовали четыре метода: УЗ (с продольными волнами и поверхностными волнами Рэлея), магнитопорошковый, капиллярный и вихретоковый методы. В докладе Jaap H.Heida, Derk J.Platenkamp «In-service Inspection Guidelines for Composite Aerospace Structures» отмечалось, что в современных авиационных конструкциях широко применяются композиционные материалы, в которых наиболее важ-

но выявлять ударные повреждения, расслоения и непрочности. Для надежного их обнаружения использовали визуальный метод, виброанализ, низкочастотный УЗ метод с антенными фазированными решетками, тепловизионный контроль. Данные мониторинга объектов на основе низкочастотного УЗК и средств акустической эмиссии не могут быть признаны без использования других физических методов, уточняющих форму и расположение несплошностей.

Цифровая радиография по-прежнему остается важнейшим методом диагностики не только ответственных соединений, но и в медицинской практике. Эта же тема рассмотрена в докладе J.Kastner «Comparison of phase contrast X-ray computed tomography methods for non-destructive testing of materials» (секция «Computed Tomography»), в котором автор использует элементы фазового контраста в рентгеновской томографии для улучшения качества диагностических изображений и в докладе D.Fratzcher «Computed THz-Tomography» (секция «Optical Methods, Terahertz») о возможностях томографии в терагерцовом диапазоне электромагнитного излучения, перспективном в промышленной, медицинской и антитеррористической диагностике. Также привлек внимание доклад T.Weinberger «Advances in High Accuracy Measurements in Visual Inspection», подтверждающий широкие возможности визуальных оптических методов в высокоточных дистанционных измерениях параметров различных ответственных объектов.

В специальном докладе на тему дефектоскопии трещин в металлических изделиях Darril P.Almond «Thermographic techniques for detection of cracks in metallic components» показал, что в ряде задач применение термографической техники вполне оправдано, так как отличается оперативностью диагностики трещин и других опасных дефектов.

В выступлении «The HOIS recommended practice for the inspection of weld corrosion» Stephen F. рассказал о проекте, в соответствии с которым 37 компаний нефтегазовой промышленности приняли участие в проведении экспериментальных исследований, направленных на борьбу с коррозией в сварных соединениях, ее раннее обнаружение и способы предотвращения.

Общие тенденции в развитии средств и технологий НК в том, что уровень моделирования процессов УЗ, вихретокового и радиографического методов контроля в последние годы значительно вырос. Наиболее значительный вклад в разработки программного обеспечения вносят европейские фирмы. Из четырех экспозиций Франции три были посвящены моделированию процессов, объектов и средств НК для УЗ и вихретокового контроля, рентгеновского и гамма-излучения – компании «Extende», «M2M» и «CEA LIST». Практически все производители средств УЗ и вихретокового контроля представили матричные преобра-



зователи. Эта новая тенденция в НК обусловлена возрастанием производительности микропроцессорных систем, позволяющих в реальном времени просчитывать значительный поток информации.

Компании Германии («Phinder KG», «Chemetall»), Бельгии («Balreau NDT»), Италии («CGM CIGIEMME s.r.l»), ЮАР («Chemserve Systems LUTD») представили новые средства магнитопорошкового контроля.

В настоящее время большинство крупных мировых брендов в области НК используют комплексный подход и выпускают приборы по УЗ и электромагнитному контролю, а часто и совмещающая в одном устройстве несколько методов, например, способных работать как с обычными УЗ датчиками, так и с ЭМА. Компания «IMASONIC», мировой лидер в области УЗ контроля, представила различные типы фазированных решеток, еще раз подтверждая общую тенденцию перехода от одиночных излучателей к их многочисленным массивам. Американская компания «Danatroniks Corp» экспонировала аппарат iFlawTM, цифровой УЗ дефектоскоп с большим 7-дюймовым WVGA (800×480), видимым при солнечном свете сенсорным экраном. Прибор iFlawTM позволяет автоматически переводить экран из ландшафтного в портретный формат. Компания «EECI Pvt. Ltd» (Индия) показала новый УЗ дефектоскоп DIGISCAN DS-322 с цветным TFT-дисплеем. Здесь есть отображение на экране измеренной амплитуды, значения параметра считывания. Измерения проводятся через изоляцию. Прибор имеет внутреннюю память и возможность прямой распечатки результатов, два канала, шаг усилителя 0,1 дБ, активную заморозку и инверсию экрана.

Автономные сканирующие системы продемонстрировали компании «Sonomatic» и «Silverwing» (Великобритания) и «Force Technology» (Дания). Специалисты «Silverwing» представили семейство аппаратов Scorpio, которые могут передвигаться по вертикальным стенам ферромагнитных баков и трубам большого диаметра на расстоянии до 30...50 м от оператора и проводить УЗ сканирование стенки в целях выявления корродированных участков. Фирма «Sonomatic» – аналогичную подвижную платформу Raptor Scanner, способную перевозить оборудование УЗ и электромагнитного контроля, составляя карту высокого разрешения со скоростью 5 м<sup>2</sup>/ч. Датчане (Force) показали автоматизированные магнитные сканирующие системы на колесном ходу, AGS-1 и AGS-2 для контроля труб большого сечения и миниатюрный трубный сканер AUS-3.

Оборудование для визуального и теплового контроля продемонстрировали фирмы «FLIR System» и «Thermo Scientific» (США), «IT Concepts GmbH» (Германия). Неподдельный интерес посетителей вызывали 3D-лазерные сканеры «EXAscан» и «REVscan» фирмы «Creaform Ltd» (Канада), про-

изводящие до 25000 измерений в секунду, имеющие разрешение 0,05 мм и объемную глубину сканирования 30 см.

В рамках конференции 17 апреля состоялся научный семинар «Наука, технология и диагностика в неразрушающем контроле» с интересной лекцией лауреата Нобелевской премии в области химии (1996 г.) Г. В. Крото «Научные исследования – ключевой стимул социального экономического развития». После выступления проф. Г. Крото, открывшего в конце 1980-х годов сферическую молекулу углерода-60, используемую теперь в нанотехнологиях, состоялась презентация практического использования результатов этого открытия. На эту тему было выступление «Наносенсоры» проф. Марка Кройцбрука (Институт БАМ, Германия).

Оба заседания прошли успешно. Во встречах участвовало более 40 человек из 17 стран мира (Австрии, Великобритании, Венгрии, Германии, Израиля, Индии, Италии, Китая, Португалии, России, Словении, США, Украины, Хорватии, Чехии, Швейцарии, ЮАР, Южной Кореи, Японии). Работой семинара руководил д-р Дж. Нардони – президент Интернациональной академии NDT и д-р Балдев Радж – вице-президент этой академии. Общее собрание и слушания в Академии NDT начались с приветствия Д.Нардони. Далее перед собравшимися с краткими сообщениями выступили д-р Балдев Радж, проф. Кришнан Баласубраманиам (Индия) и д-р Вард Руммель (США).

Выступление проф. Эверта (Институт БАМ, Германия) было посвящено сравнению возможностей нового метода с традиционно используемым УЗ и радиографическим контролем. Проф. Зденек Преворовский (Институт термомеханики АН Чехии) прочитал лекцию «Нелинейная ультразвуковая техника в НК», а также ознакомил с новыми подходами, применяемыми при УЗ контроле, особенно при работе в нелинейной области, и преимуществах использования процедуры инверсии времени для обнаружения и локализации дефектов типа трещин и т.п.

W. Swiderski в докладе «Microwave Radiation in Thermal Detection of Buried Objects – Modeling and Experiments» рассматривал возможности теплового контроля в реальных условиях при поиске находящихся в земле объектов. Отмечалось, что в солнечную погоду возможности теплового метода надежны. Другое дело при отсутствии солнечной радиации, сырой почве и как следствие при НК объекта слабый температурный контраст. Автор предложил в подобных ситуациях перейти к активному тепловому контролю, производя тепловую стимуляцию с помощью микроволнового излучения.

Значительный интерес вызвал доклад J. Kastner et al. «High resolution X-ray computed of fibre and particle filled polymers» (Австрия), в котором авторы использовали средства рентгеновской компьютерной томографии высокого разрешения вплоть



до 1 мкм. Экспериментальным исследованиям подвергались теплопластиковые полимерные материалы традиционного производства и наполненные различными частицами, повышающими эксплуатационные характеристики материалов. Всего было исследовано 12 типов современных полимерных материалов. 3D-изображения позволили оценить параметры геометрии, поверхности, объема и диаметр конструкции образцов.

С докладом на тему о нейтронной радиографии «Applications of various imaging techniques in radiography at BARS, Trombay» выступил А. М. Shaikh (Отдел физики твердого тела при ядерном центре в Bhabha). Акцент был сделан на разработке и применении новых сенсорных плоских панелей для эффективной регистрации нейтронного излучения.

Российскими учеными представлены следующие доклады.

А. А. Дубов доложил о развитии метода магнитной памяти в решении задач по анализу структуры металлоконструкций.

Ряд докладов был посвящен радиационным методам НК. Так, в докладе В. А. Клименова сообщалось о преимуществах применения малогабаритных бетатронов в передвижных системах цифровой радиографии для диагностики трубопроводов большого диаметра. В докладе В. Е. Усачева были представлены результаты радиографического контроля сложных сварных соединений, а также применения многоракурсных и двухэнергетических рентгеновских установок. Б. В. Артемьевом приведены результаты моделирования процесса контроля тонкопленочных активных металлических структур на поверхностях массивных конструкций с использованием обратно-рассеянного рентгеновского излучения.

Получили широкое распространение в современных автоматизированных системах контроля металлоконструкций электромагнитные и вихретоковые методы НК. О современном электромагнитном оборудовании, его развитии и новых областях применения представили доклады А. Е. Убочкин, А. Г. Ефимов и С. В. Клюев. В докладе В. Н. Учанина (Украина) сообщается о результатах использования вихретокового метода при автоматизированном контроле литья со значительной шероховатостью поверхности.

Доклад В.П.Вавилова был посвящен современным проблемам моделирования задач теплового метода НК, получившего достаточно широкое распространение в технологиях технической диагностики различных отраслей промышленности.

Расширяются возможности тепловидения в решении антитеррористических задач, вариантах построения аппаратуры и для конкретных применений. Ряд стендовых докладов посвящен приборным и методическим разработками применительно к конкретным условиям их использования.

Во время работы конференции был организован семинар WGI ICNDT по квалификации и сертификации персонала НК под председательством Дж. Томсона.

Активное участие в работе 18<sup>th</sup> WCNDT приняли Российское (РОНКТД) и Украинское (УОНКТД) общества НК и ТД, направившие в Дурбан делегацию общей численностью порядка 60 человек. Большой интерес вызвал стенд УОНКТД, содержащий информацию по рентгеновскому, магнитному, электромагнитному, УЗ и тепловому методам контроля. В материалах стенда отмечались корреляционные связи между магнитными параметрами термически обработанных сталей и остаточными напряжениями, характеристиками упругих деформаций, оценка остаточного ресурса стальных тросов на основе измерений магнитных характеристик.

Во время проведения конференции достигнута договоренность о подписании договоров о сотрудничестве УОНКТД с Обществами НК Кореи, Франции, США, Бразилии, Хорватии.

Стенд УОНКТД посетили М. Фарлей, М. Йоханнес, С. В. Клюев и многие другие участники. На стенде была широко представлена реклама производителей NDT-техники в Украине, в частности УкрНИИНК, литература и учебные плакаты.

У представителей института TWI вызвали интерес достижения ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по европейским программам «Ship-inspector» и LRUT, разработки по оценке качества протяженных объектов без сканирования их поверхности, по оригинальным акустическим антеннам. Большой интерес был проявлен к достижениям ИЭС по созданию подвижных намагничивающих устройств, которые на порядок увеличивают производительность магнитного НК. Все посетители стенда УОНКТД получили приглашение посетить Национальную конференцию UkrNDT-2012, которая состоится в г. Киеве с 20 по 23 ноября 2012 г.

Подробный отчет о Всемирной конференции 18<sup>th</sup> WCNDT представлен в журнале «Контроль. Диагностика» № 6 (168), 2012 г.

*Поступила в редакцию  
12.07.2012*



## ТЕХНОЛОГИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ И СОЕДИНЕНИЙ

Отдел неразрушающих методов контроля качества сварных соединений Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины уже 50 лет работает в области дефектоскопии сварных металлоконструкций, машин и сооружений и накопил большой опыт исследований, разработок, выполнения работ, поставок оборудования и материалов в различных отраслях промышленности и строительства.

**Отдел может быть Вашим деловым партнером в решении задач испытания изделий и сооружений различными методами неразрушающего контроля.**

Одно из направлений деятельности отдела – капиллярный контроль изделий, сварных соединений, наплавов и др.

В некоторых случаях этот вид контроля – единственно возможный для обследования объектов. Например – колокола «Балык», «Ранний Вознесенский», «Копя» на колокольне Киево-Печерской лавры. Материал колоколов – бронза. Магнитные методы применить нельзя, так как материал немагнитный. Ультразвуковые методы тоже не дадут результа-

тов, поскольку для поверхности колоколов характерна большая зернистость литья.

Технология контроля включала в себя очистку контролируемой поверхности, сушку горячим воздухом и выполнения капиллярного контроля с помощью материалов фирмы Chemetall GmbH производства Германии.

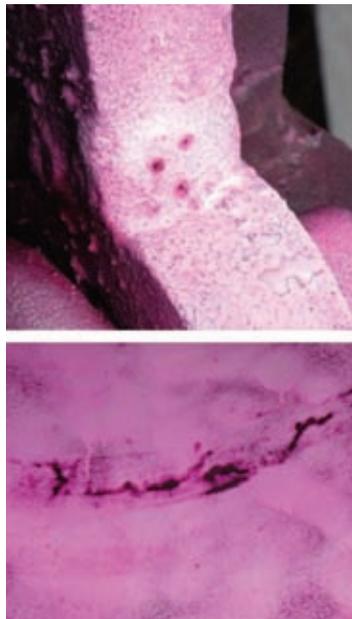
Оценка качества контролируемых объектов выполнялась в соответствии с ДСТУ EN 1289–2002 «Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Капілярний контроль зварних з'єднань. Критерії приймання».

Исследованию технического состояния подлежали тела трех колоколов и их крепежные элементы (подвески, шпильки и уши). По результатам капиллярного контроля были выявлены дефекты в крепежных элементах колокола «Балык», которые могли бы повлиять на дальнейшую работу сварных соединений.

В качестве рекомендаций предложены мероприятия по механическому исправлению дефектов сварных соединений и восстановлению сплошности сварного шва.



Передвижной стенд для капиллярного контроля с фильтрующей вытяжкой



Индикаторные следы на проявителе



Обследование колокола и подготовка к контролю

*Отдел выполняет радиационную, ультразвуковую, магнитную, вихретоковую, тепловую дефектоскопию, испытания на герметичность, механические испытания и металлографические исследования, химический анализ металла и другие испытания.*



## 7-я Национальная научно-техническая конференция и выставка

20-23 октября 2012, Киев, Украина



Организаторы



При содействии



Информационная поддержка

Международный выставочный центр  
г. Киев, Броварской пр.-т, 15



### Основные темы конференции:

- Ультразвуковой и акустико-эмиссионный методы контроля
- Вихретоковый и магнитный методы контроля
- Радиационный, тепловой и оптический методы контроля
- Низкочастотный ультразвуковой контроль протяжных объектов с ограниченным доступом к поверхности
- Вибродиагностический метод контроля
- Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса объектов повышенной опасности при эксплуатации
- Неразрушающий контроль и техническая диагностика в нефтегазовой области
- Неразрушающий контроль и техническая диагностика в авиации
- Вопросы стандартизации, сертификации и метрологического обеспечения в области НК и ТД

### Важные даты:

- Представление докладов – до 20.09.2012 г.
- Заявка на участие – до 01.10.2012 г.
- Оплата за участие – до 01.11.2012 г.
- (льготная оплата – до 01.09.2012 г.)

### Адреса и телефоны Оргкомитета:

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики  
ул. Боженко, 11, 03680, г. Киев-150, ГСП  
Тел.: (+380 44) 200-46-66, 205-21-72, 205-22-49  
Факс: (+380 44) 205-31-66  
E-mail: usndt@ukr.net  
www.usndt.com.ua

