

**Учредители:** Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Международная Ассоциация «Сварка» (издатель)

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Главный редактор  
**Б. Е. ПАТОН**

*Ученые ИЭС им. Е. О. Патона*  
к.ф.-м.н. **О. И. Бойчук**, д.т.н. **Э. Ф. Гарф**,  
к.т.н. **Е. А. Давыдов**, к.ф.-м.н. **А. Т. Зельниченко**,  
д.т.н. **Л. М. Лобанов**,  
д.т.н. **А. Я. Недосека** (зам. гл. ред.),  
**Ю. Н. Посыпайко**, **Н. А. Притула** (отв. секретарь)  
д.т.н. **В. А. Троицкий** (зам. гл. ред.),  
к.т.н. **Е. В. Шаповалов**

*Ученые институтов и университетов Украины*  
д.т.н. **В. А. Стрижало**

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

к.х.н. **М. Л. Казакевич**

Ин-т физической химии, Киев, Украина

д.т.н. **О. М. Карпаш**

Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа, Украина

д.ф.-м.н. **З. Т. Назарчук**, д.т.н. **В. Н. Учанин**

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

д.т.н. **Г. И. Прокопенко**

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

д.т.н. **В. А. Стороженко**

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

д.т.н. **С. К. Фомичов**

НТУУ «Киев. полит. ин-т им. Игоря Сикорского», Киев

д.т.н. **М. Г. Чаусов**

Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

*Зарубежные ученые*  
д.т.н. **Н. П. Алешин**

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

д.т.н. **В. Л. Венгринович**

Ин-т прикл. физики, Минск, Республика Беларусь

д.т.н. **В. В. Ключев**

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

д.т.н. **В. Е. Щербинин**

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

**Адрес редакции**

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев, 03150, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

**Редакторы**

К. Г. Григоренко, Т. В. Юштина

**Электронная верстка**

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета

**Свидетельство**

о государственной регистрации

KB4787 от 09.01.2001.

ISSN 0235-3474

Doi.org/10.15407/tdnk

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А.** Влияние характеристик АЭ датчика на регистрируемые спектры волн ..... 3

**МИЛЕНИН А. С., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., ПИВТОРАК Н. И.** Методика численного прогнозирования работоспособности трубопроводных элементов с коррозионно-эрозионными дефектами в условиях высокотемпературной эксплуатации ..... 7

**ОРИНЯК И. В., КРАСОВСКИЙ А. Я., БОРОДИЙ М. В., АГЕЕВ С. М.** Разработка методики для определения допустимой толщины стенки трубопроводов АЭС при эрозионно-коррозионном износе материала ..... 14

**АЛЕКСЕНКО В. Л., ШАРКО А. А., СМЕТАНКИН С. А., СТЕПАНЧИКОВ Д. М., ЮРЕНИН К. Ю.** Обнаружение акустико-эмиссионных эффектов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп..... 25

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

**ТРОИЦКИЙ В. А., ГОРБИК В. М., БОРОДАЙ О. С.** Сравнение различных систем намагничивающих устройств с постоянными магнитами для магнитопорошкового метода контроля ..... 32

**БОГАЧЕВ И. В., МЕЛЕЩЕНКО Л. В.** Улучшение основных параметров магнитострикционных сенсоров..... 42

**СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., ЯРЕМА Р. Я.** Экспресс-методика акустико-эмиссионного ранжирования гальванопокрытий по качеству ..... 46

**ПОРЕВ В. А., ТОМАШУК А. С.** Контроль параметров нагретой проволоки в процессе волочения ..... 52

**ГЛУХОВСКИЙ В. Ю., ОНАЩЕНКО Б. А.** Особенности создания натуральных образцов для подготовки специалистов всех уровней по тепловому контролю ..... 56

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

**ПРОЦЕНКО Н. А.** Внедрение гармонизированных международных и европейских стандартов в Украине ..... 60

**ХРОНИКА**

Диссертация на соискание ученой степени ..... 63

XVI Международный промышленный форум ..... 64

**ИНФОРМАЦИЯ**

Новые книги по акустической эмиссии ..... 66

**ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:**

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

# ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА І НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

# TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA І NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Виходить 4 рази на рік

Quarterly issue

Головний редактор Б. Є. Патон

Editor-in-Chief B. E. Paton

## ЗМІСТ

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А. Вплив характеристик АЕ датчика на спектри хвиль, що реєструються.....	3
МИЛЕНИН О. С., ВЕЛИКОВАНЕНКО О. А., РОЗИНКА Г. П., ПИВТОРАК Н. І. Методика чисельного прогнозування роботоздатності трубопровідних елементів із корозійно-ерозійними дефектами в умовах високотемпературної експлуатації.....	7
ОРИНЯК І. В., КРАСОВСЬКИЙ А. Я., БОРОДИЙ М. В., АГЕЄВ С. М. Розробка методики для визначення допустимої товщини стінки трубопроводів АЕС при ерозійно-корозійному зношуванні матеріалу.....	14
АЛЕКСЕНКО В. Л., ШАРКО А. О., СМЕТАНКІН С. А., СТЕПАНЧИКОВ Д. М., ЮРЕНІН К. Ю. Виявлення акустико-емісійних ефектів при повторному навантаженні зразків зі сталі СтЗсп.....	25

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

ТРОЇЦЬКИЙ В. О., ГОРБИК В. М., БОРОДАЙ О. С. Порівняння різних систем намагнічуючих пристроїв з постійними магнітами для магнітопорошкового методу контролю.....	32
БОГАЧЕВ І. В., МЕЛЕЩЕНКО Л. В. Покращення основних параметрів магнітострикційних сенсорів.....	42
СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., ЯРЕМА Р. Я. Експрес-методика акустико-емісійного ранжування гальванопокриттів за якістю.....	46
ПОРЕВ В. А., ТОМАШУК А. С. Контроль параметрів нагрітого дроту в процесі волочіння.....	52
ГЛУХОВСЬКИЙ В. Ю., ОНАЩЕНКО Б. О. Особливості створення натурних зразків для підготовки фахівців всіх рівнів з теплового контролю.....	56

### КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

ПРОЦЕНКО Н. О. Впровадження гармонізованих міжнародних і європейських стандартів в зварювальне виробництво України.....	60
---	----

### ХРОНІКА

Дисертація на здобуття вченого ступеня.....	63
XVI Міжнародний промисловий форум.....	64

### ІНФОРМАЦІЯ

Нові книги з акустичної емісії.....	66
-------------------------------------	----

## CONTENTS

### SCIENTIFIC-TECHNICAL

NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A. Effect of characteristics of AE transducer on registered wave spectra.....	3
MILENIN A. S., VELIKOVANENKO E. A., ROZYNKA G. Ph., PIVTORAK N. I. Methodology of numerical prediction of serviceability of pipeline elements with corrosion-erosion defects under conditions of high-temperature operation.....	7
ORYNYAK I. V., KRASOVSKIY A. Ya., BORODIY M. V., AGEEV S. M. Development of procedure for determination of wall thickness in NPP pipeline at erosion-corrosion wear of material.....	14
ALEKSENKO V. L., SHARKO A. A., SMETANKIN S. A., STEPANCHIKOV D. M., YURENIN K. Yu. Detection of acoustic-emission effects during reloading of St3sp steel specimens.....	25

### INDUSTRIAL

TROITSKII V. A., GORBIK V. M., BORODAI O. S. Comparison of different systems of magnetizing devices with constant magnets for magnetic particle testing.....	32
BOGACHEV I. V., MELESHCHENKO L. V. Improvement of main parameters of magnetostrictive transducers.....	42
SKALSKY V. R., YAREMA R. Ya. Express-method for acoustic-emission ranking of electrodeposits on quality.....	46
POREV V. A., TOMASHUK A. S. Control of parameters of heated wire in process of drawing.....	52
GLUHOVSKII V. Yu., ONASHCHENKO B. O. Features of preparation of full-scale samples for training the specialists on heat monitoring of all levels.....	56

### BRIEF INFORMATION

PROTSENKO N. A. Implementation of harmonized international and european standards in Ukraine.....	60
---	----

### NEWS

Thesis for scientific degree.....	63
XVI International industrial forum.....	64

### INFORMATION

New books on acoustic emission.....	66
-------------------------------------	----

#### Адреса редакції

03150, Україна, м. Київ, вул.Казимира Малевича, 11  
 ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
 Тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-23-90  
 E-mail: journal@paton.kiev.ua  
 www.patonpublishinghouse.com

#### Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
 11, Kazimir Malevich str., 03150, Kyiv, Ukraine  
 Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90  
 E-mail: journal@paton.kiev.ua  
 www.patonpublishinghouse.com

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АЭ ДАТЧИКА НА РЕГИСТРИРУЕМЫЕ СПЕКТРЫ ВОЛН

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В ранее опубликованных работах представлены формулы для расчета перемещений наружной поверхности пластин, описывающие полный спектр волн, распространяющихся в пластине. Аналитически было показано, что АЭ волны в пластинах могут распространяться со скоростями значительно выше скорости  $C_1$ . Однако контролирующая аппаратура воспринимает только ту часть спектра волны, которую пропускает акустический датчик, имеющий конкретную амплитудно-частотную характеристику. Эта характеристика связана, в первую очередь, с конструкцией и размерами чувствительного элемента и корпуса датчика. В статье рассмотрены особенности регистрации волн АЭ с использованием датчиков с различной амплитудно-частотной характеристикой. Библиогр. 4, рис. 2.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, амплитудно-частотная характеристика, амплитудно-волновая характеристика, датчик акустических волн, характеристика датчика

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) типичного АЭ датчика на основе пьезокерамики, полученную экспериментальным путем с использованием специальных стендов, позволяющих выполнять такие измерения<sup>1</sup>. На рис. 1 приведены результаты этих измерений в полосе частот от 50 до 500 кГц. Впоследствии такие характеристики были получены специалистами ИЭС в диапазоне частот от 25 до 800 кГц.

Последние измерения АЧХ были приняты за основу при разработке и метрологической аттестации датчика АЭ, разработанного в ИЭС<sup>2</sup>. Учитывая, что расчет волновых полей, вызванных АЭ в материалах при изменении их структуры, производился суммированием элементарных волн по их волновым числам, то кривые АЧХ были пересчитаны с учетом этой особенности. На рис. 1, б представлена полоса пропускания того же датчи-

ка, но в координатах волнового числа  $\alpha$  (см<sup>-1</sup>) и относительной скорости распространения каждой элементарной волны  $C_d/C_i$ . Для аналитического представления АЧХ в этом случае использовали представления АЧХ в этом случае использовали зависимость  $2\pi f = \alpha C_\alpha$  и приближенную кривую, полученную после обработки экспериментальных данных (рис. 1, а). Эту кривую в виде функциональной зависимости можно приближенно записать:

$$A_y = \exp[-0,006^2(f - f_0)^2],$$

и после подстановки,  $f = \frac{\alpha C}{2\pi}$ , получим:

$$A_y = \exp\left[-k_i^2 \left(\alpha \frac{C_\alpha}{C_i} - \frac{2\pi f_0}{C_i}\right)^2\right], \quad (1)$$

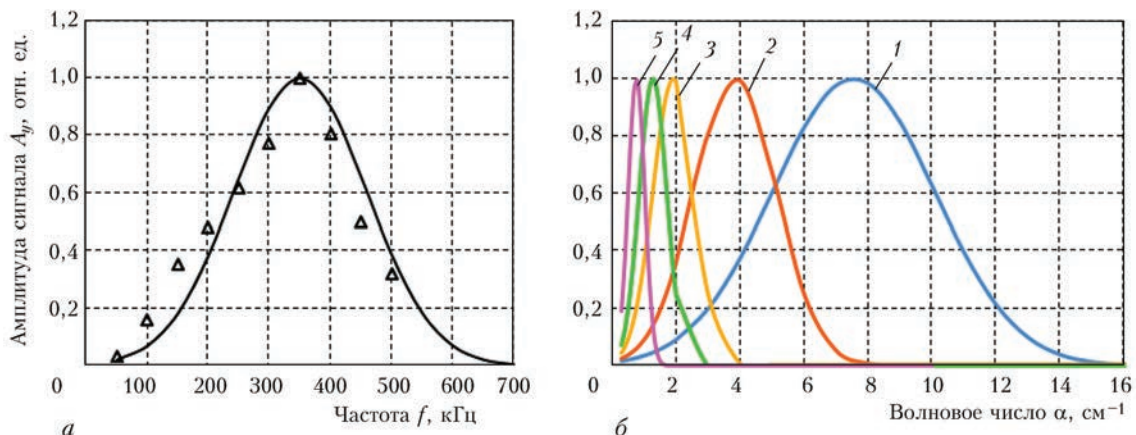


Рис. 1. Амплитудно-частотная (а) и амплитудно-волновая (АВХ) (б) характеристики АЭ датчика в зависимости от частоты и волнового числа ( $\Delta$  – эксперим., — аналит.): 1 –  $C_\alpha/C_1 = 0,51$ ; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 5

<sup>1</sup> Экспериментальные значения АЧХ были измерены специалистами Хабаровского филиала Госстандарта СССР вместе со специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона.

<sup>2</sup> Разработчики Яременко М. А., Харченко Л. Ф.

где  $k_i = \frac{0,006 C_i}{2\pi}$ , см;  $f_0 = 350$  кГц – частота с максимальным значением передаваемой амплитуды принятого к рассмотрению АЭ датчика (рис. 1).

Как видно, в координатах волнового числа  $\alpha$  полоса пропускания сигнала АЭ находится в пределах  $1 \dots 14$  см<sup>-1</sup>, что соответствует частотам  $50 \dots 700$  кГц. Анализируя формулу (1), видим, что полоса пропускания того же датчика зависит от относительной скорости распространения волны  $C_\alpha/C_i$ . Здесь  $A_y$  – условная амплитуда АЭ сигнала;  $C_\alpha$  – текущее значение скорости перемещающейся волны АЭ;  $C_i$  – опорные значения скорости. В нашем случае это скорости  $C_1$  и  $C_2$ . В расчетах принято  $C_2 = 0,316 \cdot 10^6$  см/с;  $C_1 = 0,571 \cdot 10^6$  см/с;  $f_0 = 0,35 \cdot 10^6$  Гц;  $k_1 = 0,55$  см (при  $C_i = C_1$  в диапазоне  $C_\alpha \geq C_1$ ) и  $k_2 = 0,3$  см (при  $C_i = C_2$  в диапазоне  $C_\alpha < C_1$ ).

Формула (1) и графики на рис. 1 хорошо иллюстрируют то, что при проведении расчетов в координатах с волновым числом  $\alpha$  в функциональной зависимости АЧХ существенным является параметр скорости. Результаты этих расчетов приведены на рис. 1, б, где видно, что с увеличением скорости движения волны спектр пропускаемых волн сужается и перемещается в сторону меньших значений  $\alpha$ . Рассмотренный процесс фильтрации сигналов АЭ в сильной мере влияет на значения конечной информации, получаемой аппаратурой. Можно сделать заключение, что при высоких скоростях распространения АЭ волн последние могут не фиксироваться датчиком. Расчеты показали, что в данном случае таким пределом оказалось отношение  $C_\alpha/C_1$ , равное 5. Ниже представлена информация о распределении перемещений на поверхности пластины в зависимости от наличия фильтрующих характеристик АЭ датчика. Для расчетов перемещений использованы общие формулы распространения упругих АЭ волн в пластинах, полученные ранее [1–4]. Для наглядности переписем их в упрощенном виде. Формулы (5.69; 5.76) с учетом члена фильтрующей характеристики АЭ датчика примут вид:

1. Для скоростей меньше  $C_2$  (формула 5.69, стр. 560 [1]):

$$w = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \exp \left[ -k_2^2 \left( \alpha \frac{C_\alpha}{C_2} - \frac{2\pi f_0}{C_2} \right) \right] \times \\ \times \left\{ \alpha \gamma_1 C + P_0 \exp(-z_0 \alpha \gamma_1) + \alpha^2 [A + B] \right\} \times \\ \times \alpha J_0(\alpha r) \sin(\alpha C_\alpha t) d\alpha. \quad (2)$$

Значения коэффициентов  $A, B, C, P_0$  на стр. 557–558.

2. Для  $C_2 < C < C_1$  (формула 5.76, стр. 568 [1]):

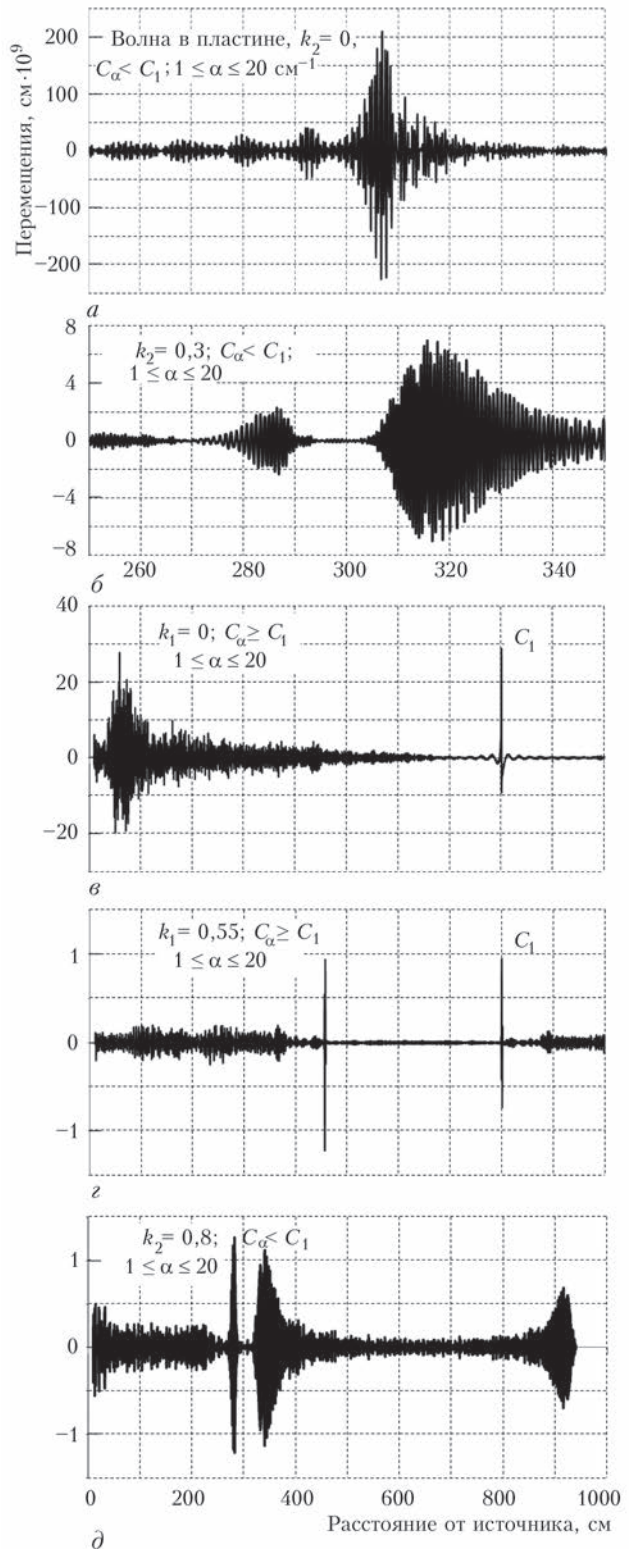


Рис. 2. Графики распространения АЭ волны в пластине толщиной 1 см: а – реальная АЭ волна, распространяющаяся в пластине; б – информация, получаемая от датчика при скоростях волн менее  $C_1$  ( $k_2 = 0,3$  см); в – волна АЭ, реально двигающаяся в пластине при  $C_\alpha \geq C_1$ ; з – информация, получаемая от датчика при скоростях волн больше  $C_1$  ( $k_1 = 0,55$  см); д – фильтрация сигнала АЭ датчиком с более узкой полосой пропускания ( $k_2 = 0,8$  см;  $C_\alpha < C_1$ )

$$w = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \exp \left[ -k_2^2 \left( \alpha \frac{C_\alpha}{C_2} - \frac{2\pi f_0}{C_2} \right)^2 \right] \times \left[ \alpha \gamma_1 C + P_0 \exp(-\alpha \gamma_1 z_0) + \alpha^2 B \right] \times \alpha J_0(\alpha r) \sin(\alpha C_\alpha t) d\alpha \quad (3)$$

3. Для скоростей выше  $C_1$  [2]:

$$w = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{2\pi^2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1+\gamma_2^2}{1-\gamma_2^2} \times \exp \left[ -k_1^2 \left( \alpha \frac{C_\alpha}{C_1} - \frac{2\pi f_0}{C_1} \right)^2 \right] \cos(\alpha \gamma_1 z_0) \times \sin(\alpha C_\alpha t) \alpha J_0(\alpha r) d\alpha \quad (4)$$

Здесь  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – пределы рабочей полосы АЭ датчика по волновым числам.

Для оценки влияния характеристик АЭ датчика на информацию, получаемую приборами, рассмотрим два примера. В первом примере рассмотрим влияние на конечную информацию АЧХ характеристику акустического датчика разработки ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 1).

Расчеты будем выполнять по формулам (3) и (4), представленным выше. На втором примере рассмотрим влияние более узкой полосы пропускания АЭ волны, регистрируемые датчиком с такой АЧХ. Сначала найдем численные значения коэффициента  $k_i$  для случая, когда величина скорости  $C_\alpha$  не превосходит  $C_1$  и случай, когда  $C_\alpha > C_1$ . Подставляя в выражение для  $k_i$  сначала  $C_2$ , а затем  $C_1$ , получим искомые величины. Итак, для  $C_\alpha < C_1$   $k_2 = 0,3$  см; для  $C_\alpha > C_1$   $k_1 = 0,55$  см. Для второго случая коэффициент  $k_2$  был принят равным 0,8 см. Ниже представлены результаты расчетов распространяющейся в стальной пластине бесконечных размеров волны. Толщина пластины принята равной 1 см. Момент времени  $t = 0,53 \cdot 10^{-3}$  с (для рис. 2, а, б, д) и  $1,4 \cdot 10^{-3}$  с (для рис. 2, в, з).

Из графиков на рис. 2 видно, чем больше коэффициент  $k_i$ , характеризующий ширину полосы пропускания датчика, тем больше снижается амплитуда сигнала. При этом частотные характеристики сигнала изменяются незначительно. В диапазоне больших скоростей ( $C_\alpha > C_1$ ) амплитуда сигналов АЭ снижается существенно больше, более выражено изменяется и частота сигнала. Из рис. 2, в, з видно, что при распространении волн с высокими скоростями достаточно четко выделяется волна, двигающаяся со скоростью  $C_1$ . При этом передний фронт АЭ сигнала за счет этой волны становится достаточно «крутым», что увеличивает точность определения координат при локации.

Расчетами также показано, что существующие АЭ датчики на основе пьезокерамики могут зарегистрировать АЭ волны, распространяющиеся со скоростями не более  $5C_1$ . В связи с этим волны, распространяющиеся со скоростями выше  $5C_1$ , физически до сих пор не зарегистрированы. Суммарное значение амплитуды сигнала АЭ, как видно из рис. 2, определяется в основном волнами, распространяющимися со скоростями в промежутке между  $C_2$  и  $C_1$ .

В заключение следует отметить, что физическое представление волн в виде суммы элементарных колебаний среды, формирующихся ее граничными и начальными условиями, позволили разработать методику расчета возникновения и изменения суммарного волнового поля в этой среде [1].

Разработанные аналитические зависимости позволяют в конечном счете выбирать конструкцию АЭ датчика и необходимые параметры приборного и программного регулирования полосы пропускания волн в заданном диапазоне волновых чисел или частот и, тем самым, использовать наиболее оптимальный вариант технологии обработки АЭ информации.

### Выводы

1. АЧХ (АВХ) характеристики АЭ датчика существенно влияют на конечный сигнал, поступающий с пластины на физическую и математическую обработку.
2. Амплитуда и частота отфильтрованного датчиком сигнала АЭ зависит от АЧХ датчика.
3. Конструируя АЭ датчик и измерительную аппаратуру, необходимо выбирать аппаратные и математические фильтры с учетом требований к конечному АЭ сигналу.
4. Суммарная амплитуда АЭ сигнала определяется в основном волнами, распространяющимися со скоростями в промежутке между  $C_2$  и  $C_1$ .
5. Расчетами показано, что существующие АЭ датчики на основе пьезокерамики могут зарегистрировать АЭ волны, распространяющиеся со скоростями не более  $5C_1$ .
6. Необходимо отметить возможность значительного повышения точности определения координат источников АЭ при переходе работы измерительной аппаратуры на сигналы АЭ, распространяющиеся со скоростями, превышающими  $C_1$ .

### Список литературы

1. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред.). Киев, Индпром.
2. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. (2013) О движении волн акустической эмиссии с большими скоростями. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 3–9.
3. Недосека А. Я., Недосека С. А. (2015) Моделирование колебаний чувствительной пластинки применительно к датчикам акустической эмиссии. Сообщение 1. *Там же*, 1, 17–22.

4. Недосека А. Я., Недосека С. А. (2015) Моделирование колебаний чувствительной пластинки применительно к датчикам акустической эмиссии. Сообщение 2. *Там же*, **2**, 10–15.

**References**

1. Nedoseka, A.Ya. (2008) *Fundamentals of design and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton, Kiev, Indprom [in Russian].
2. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Voloshkevich, I.G. (2013) On movement of acoustic emission waves at high speeds. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 3-9 [in Russian].
3. Nedoseka A.Ya., Nedoseka, S.A. (2015) Simulation of sensitive plate vibrations in the case of acoustic emission sensors. Information 1. *Ibid.*, **1**, 17-22 [in Russian].
4. Nedoseka A.Ya., Nedoseka, S.A. (2015) Simulation of sensitive plate vibrations in the case of acoustic emission sensors. Information 2. *Ibid.*, **2**, 10-15[in Russian].

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

**ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК АЕ ДАТЧИКА НА СПЕКТРИ ХВИЛЬ, ЩО РЕЄСТРУЮТЬСЯ**

У раніше опублікованих роботах представлені формули для розрахунку переміщень зовнішньої поверхні пластин, що описують повний спектр хвиль, які поширюються в пластині. Аналітично було показано, що АЕ хвилі в пластинах можуть поширюватися зі швидкостями значно вищими швидкості  $C_1$ . Однак контролююча апаратура сприймає тільки ту частину спектра хвилі, яку пропускає акустичний датчик, що має конкретну амплітудно-частотну характеристику. Ця характеристика пов'язана, в першу чергу, з конструкцією і розмірами

чутливого елемента і корпусу датчика. У статті розглянуто особливості реєстрації хвиль АЕ з використанням датчиків з різною амплітудно-частотною характеристикою. *Бібліогр.* **4**, рис. 2.

Ключові слова: акустична емісія, амплітудно-частотна характеристика, амплітудно-хвильова характеристика, датчик акустичних хвиль, характеристика датчика

**EFFECT OF CHARACTERISTICS OF AE TRANSDUCER ON REGISTERED WAVE SPECTRA**

A.Ya. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazimir Malevich Str., Kiev, 03150 E-mail: office@paton.kiev.ua

Earlier published works represent the formulas for calculation of movement of outer surface of the plates, describing the complete wave spectra propagating in the plate. It was shown analytically, that AE waves in the plates can propagate with the velocities higher than  $C_1$ . However, controlling apparatuses take only that part of the wave spectrum, which is passed through acoustic transducer having specific amplitude-frequency characteristic. This characteristic is related, first of all, with design and dimensions of sensing element and transducer housing. The paper considers the peculiarities of registration of AE waves using the transducers with different amplitude-frequency characteristic. 4 Ref., 2 Fig.

Keywords: acoustic emission, amplitude-frequency characteristic, amplitude-wave characteristic, acoustic wave transducer, transducer characteristic

Поступила в редакцію 05.09.2017

**ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»**

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный» 10 – 14 сентября 2018 г.



**Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ  
Международная Ассоциация «Сварка»**

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и вместе с тезисами доклада направить ее в Оргкомитет до 20 июня 2018 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

**Оргкомитет**

ІЕЗ ім. Е. О. Патона НАН України, вул. Казимира Малевича 11, г. Київ, 03680, Україна; тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26 E-mail: journal@paton.kiev.ua <http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

**Контрольные даты**

Подача заявок на участие и тезисов докладов	до 20.06.2018 г.
Расылка второго информационного сообщения и подтверждение участия	до 12.07.2018 г.
Оплата регистрационного взноса	до 11.09.2018 г.

# МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОРРОЗИОННО-ЭРОЗИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. С. МИЛЕНИН, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработан комплекс моделей численного прогнозирования докритического повреждения и предельного состояния сварных трубопроводных элементов в условиях высокотемпературной эксплуатации, учитывающих особенности монтажной сварки и наличие изолированного дефекта локального утонения стенки коррозионно-эрозионной природы. На примере характерного трубопровода из нержавеющей стали исследованы особенности текущего и предельного состояния сварных конструкций в условиях развитых деформаций ползучести. Показано влияние дефекта локального утонения стенки трубопроводного элемента на закономерности докритического и макроскопического повреждения металла при сложном температурно-силовом воздействии. Библиогр. 11, рис. 7.

*Ключевые слова:* докритическое повреждение, деформации ползучести, трубопроводный элемент, дефект утонения стенки, предельное состояние, численное прогнозирование

Экспертный анализ результатов инструментального мониторинга состояния ответственных трубопроводов, эксплуатирующихся при высоких температурах и высоком внутреннем давлении, является основанием продолжения ресурса на сверхпроектные сроки, а также, в случае обнаружения дефектов несплошности металла, позволяет подтвердить необходимую статическую прочность и работоспособность. Наличие локальных геометрических и структурных неоднородностей, в частности, в области монтажных или ремонтных сварных швов, усложняет оценку фактического и предельного состояния конструкций и их сопротивляемости разрушению. Кроме того, совместное воздействие высоких температур и внешнего усилия (внутреннего давления) определяет сложный механизм развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести, которые приводят к зарождению и накоплению докритического повреждения материала вплоть до его предельного состояния и макроскопического разрушения.

Как показывает практика эксплуатации трубопроводов атомных и тепловых электростанций, в диапазоне температур 550...650 °С процессы ползучести оказывают существенное влияние на длительную прочность, особенно в случае наличия концентраторов напряжений в области геометрических аномалий (трещин, локальных коррозионно-эрозионных утонений) или конструктивных неоднородностей (мест стыков разнотолщинных элементов, трубопроводной арматуры, прочее) [1, 2]. Накопление необратимых деформаций ползучести может повлечь зарожде-

ние и развитие равномерно распределенной поврежденности материала труб с сопутствующим снижением их несущей способности. Инструментальный контроль докритической поврежденности достаточно сложен, так как нарушение сплошности материала происходит в микроскопическом масштабе. В силу особенностей зарождения микроразрушенности, интенсивность ее развития может быть обнаружена методом акустической эмиссии [3], но этот метод не получил достаточно широкого распространения, поэтому рациональным является применение методов численного прогнозирования. Решение данной задачи осложняется нелинейной взаимозависимостью между процессами термомодеформирования и разрушения, поэтому актуальна разработка методов и средств прогнозирования состояния и работоспособности ответственных (в том числе сварных) конструкций при сложном температурно-силовом эксплуатационном воздействии.

В рамках настоящей работы на примере трубопроводных элементов (ТЭ) с обнаруженными при дефектоскопии локальными коррозионно-эрозионными потерями металла в области кольцевых монтажных сварных швов исследованы особенности зарождения и развития докритической и макроскопической поврежденности металла, определяющие предельное состояние и работоспособность конструкции в условиях высокотемпературной эксплуатации.

Согласно классическим представлениям механики сплошных сред развитие деформаций ползучести является многоэтапным процессом

(см. рис. 1) и включает неустановившуюся (I), стационарную (II) и ускоренную (III) ползучесть [4]. Следует отметить, что с практической точки зрения наиболее важными являются этапы II и III, проявляющиеся при высоких механических напряжениях, так как процесс температурной активации ползучести на этапе I превалирует в относительно небольшом диапазоне температур и при низких нагрузках. По мере накопления необратимых деформаций мгновенной пластичности  $\varepsilon^{mp}$  и ползучести  $\varepsilon^c$  может быть достигнута предельная деформационная способность материала, что имеет своим следствием зарождение микропористости по механизму вязкого разрушения. При относительно низкой температуре ползучесть редко приводит к макроразрушению характерных конструкционных материалов, тогда как ее повышение ведет к увеличению вклада этого механизма деформирования в процессы нарушения сплошности. Развита высокая температурная ползучесть, обусловленная существенными внешними усилиями, ведет к транскристаллитному разрушению металла по механизму порообразования. Согласно гипотезе Лемэтра [5], зарождение и дальнейшее развитие докритической поврежденности такого типа зависит не от механизма пластического деформирования, а от текущей суммарной величины деформации, т.е. для рассматриваемого случая от  $\varepsilon^p = (\varepsilon^{mp} + \varepsilon^c)$ . Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции в конкретных условиях эксплуатации должно учитывать особенности совместного развития необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести наряду с неравномерно распределенной докритической поврежденностью металла в процессе эксплуатации рассматриваемого ТЭ.

Приращение компонентов тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  в общем случае представимо в виде суммы следующих составляющих:

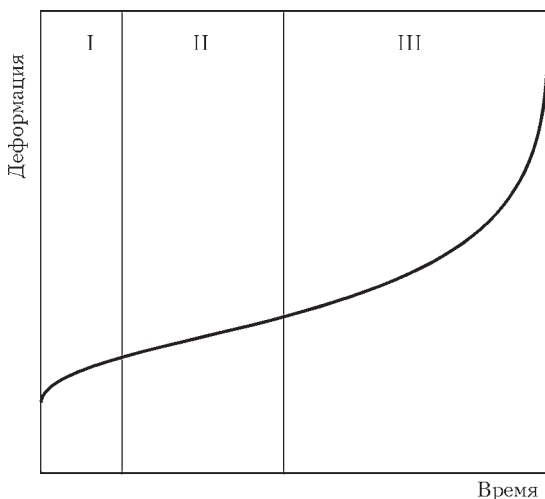


Рис. 1. Схематическая кривая ползучести для конструкционной стали при постоянном растягивающем усилии и постоянной температуре (I, II, III – различные этапы высокотемпературного деформирования)

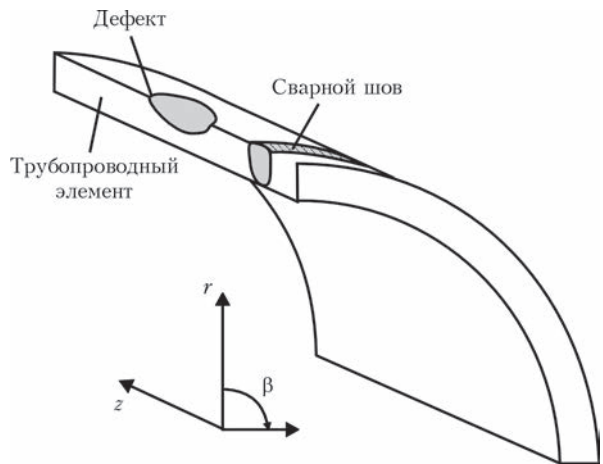


Рис. 2. Схема трубопроводного элемента с локальным дефектом потери металла на внешней поверхности

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{mp} + d\varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij} (d\varepsilon_T + df/3), \quad (1)$$

где  $d\varepsilon_{ij}^e$ ,  $d\varepsilon_{ij}^{mp}$ ,  $d\varepsilon_{ij}^c$ ,  $\delta_{ij}d\varepsilon_T$ ,  $\delta_{ij}df/3$  – компоненты приращения тензора деформаций, которые обусловлены упругим механизмом деформирования, мгновенной пластичностью, ползучестью, термическим расширением и докритическим разрушением, соответственно,  $i, j = r, \beta, z$  (рис. 2).

Приращение деформации ползучести  $d\varepsilon_{ij}^c$  за промежуток времени  $dt$ , фигурирующее в (1), может быть выражено с помощью функции ползучести  $\Omega = \Omega(\sigma_i, T)$  следующим образом [6]:

$$d\varepsilon_{ij}^c = \Omega(\sigma_i, T) (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) dt, \quad (2)$$

где  $T$  – текущая температура материала;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma$  – средние напряжения.

Как было показано выше, на различных этапах деформирования степень ползучести определяется либо процессом температурной активации, либо величиной механических напряжений. Поэтому  $\Omega(\sigma_i, T)$  представима в виде произведения температурной составляющей  $\Omega_1$  (функция Аррениуса) и функции напряжений  $\Omega_2$  (уравнение Бейли–Нортон):

$$\Omega(\sigma_i, T) = \Omega_1(T) \cdot \Omega_2(\sigma_i), \quad (3)$$

$$\text{где } \Omega_1(T) = A \exp\left(\frac{G_c}{T + 273}\right); \quad \Omega_2(\sigma_i) = \sigma_i^n; \quad (4)$$

$n, A, G_c$  – константы.

Согласно теории пластического течения, развитие пластичности определяется интенсивностью напряженного состояния по отношению к поверхности текучести материала  $\Phi$ . Для поврежденного материала эта поверхность может быть описана в рамках модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана [7]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T}\right)^2 - (q_3 f')^2 + 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right) - 1, \quad (5)$$



где  $q_1, q_2, q_3$  – константы;  $f'$  – эквивалентная концентрация равномерно распределенных пор до критического разрушения материала;  $\sigma_T$  – предел текучести.

Величина эквивалентной концентрации пор, фигурирующая в (5), определяется следующим образом:

$$f' = \begin{cases} f, & \text{если } f \leq f_c; \\ f_c + \frac{f_w' - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c), & \text{если } f > f_c, \end{cases} \quad (6)$$

где  $f_c$  – критическое значение концентрации несплошности, до которого отдельные поры не взаимодействуют, принято считать равным 0,15;  $f_F$  – концентрация пор, при которой происходит макроразрушение;  $f_w' = 1/q_1$ .

Следует отметить, что предельный переход  $f' \rightarrow 0$  переводит условия пластического течения (5), (6) в критерий Мизеса, что необходимо учитывать при построении континуальных моделей напряженно-деформированного и поврежденного состояний конструкции.

Критерием локального зарождения вязкого разрушения в изначально неповрежденном материале в настоящей работе принят модифицированный закон Джонсона–Кука в следующей формулировке [8]:

$$\int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c} > 1, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_c$  – критическая величина интенсивности пластических деформаций  $\varepsilon_i^p$ , являющаяся характеристикой конкретного материала.

Выполнение (7) в какой-либо области рассматриваемой конструкции означает появление микропористости вязкого разрушения с объемной концентрацией несплошности  $f_0$ . Рост концентрации пор вязкого разрушения при последующем пластическом течении металла определяется законом Райса–Трейси [9]:

$$df = f_0 K_1 \exp\left(K_2 \frac{\sigma}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p, \quad (8)$$

где  $K_1, K_2$  – константы.

Решение совместной задачи напряженно-деформированного и поврежденного состояний материала сварного трубопровода в условиях монтажной сварки и последующей высокотемпературной эксплуатации было реализовано путем численного прослеживания деформаций термопластичности и ползучести в рамках конечно-элементной краевой задачи. В этом случае приращение общих деформаций в каждом конкретном конечном элементе согласно (1) может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} = & \left[ \Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] \left( \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right) + \\ & + \delta_{ij} \left( K \sigma + \Delta\varepsilon_T + \Delta f / 3 \right) - \\ & - \left[ \frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] \left( \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma \right)^* - (K \sigma)^*, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Psi$  – функция состояния упруго-пластического материала, определяющая степень развития пластического течения;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $G$  – модуль сдвига, символ «\*» относит переменную или выражение к предыдущему шагу прослеживания.

Нелинейность по пластическому деформированию решается путем итерирования по функции  $\Psi$  до выполнения условий равновесия, исходя из следующих допущений [10]:

$$\begin{aligned} \Psi = & \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T(T) \times \\ & \times \sqrt{1 + (q_3 f')^2 - 2q_1 f' \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma}{2\sigma_T}\right)}; \\ \Psi > & \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s; \end{aligned} \quad (10)$$

состояние  $\sigma_i > \sigma_s$  недопустимо.

Существенное развитие докритического разрушения в конечном элементе может привести к потере его несущей способности, т. е. макроскопическому разрушению из-за пластической неустойчивости, значительного снижения несущего нетто-сечения в результате порообразования или микроскола. Поэтому в качестве критерия разрушения некоторого конечного элемента предложено использовать численный критерий хрупко-вязкого разрушения в следующей формулировке:

$$\begin{aligned} \left( \Psi - \frac{1}{2G} \right)_{KP} & \geq \frac{\varepsilon_f - (\varepsilon^p)'}{1,5\sigma_s(\varepsilon^p, T)}; \\ f' = & \frac{1}{q_1} \exp\left(-\frac{3q_2\sigma}{2\sigma_T}\right); \\ \frac{\sigma_1}{1 - 2f/3} & > S_K, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $S_K$  – напряжения микроскола;  $\varepsilon_f$  – предельная деформационная способность материала.

Изложенная выше методология позволила провести исследования особенностей докритического повреждения металла ответственных сварных ТЭ в условиях развитой высокотемпературной ползучести с учетом возможного обнаружения дефектов коррозионно-эрозионной природы. В качестве примера был рассмотрен участок трубопровода из нержавеющей стали 15Х2МФА диаметром  $D = 300$  мм, толщиной стенки  $\delta = 15$  мм с кольце-

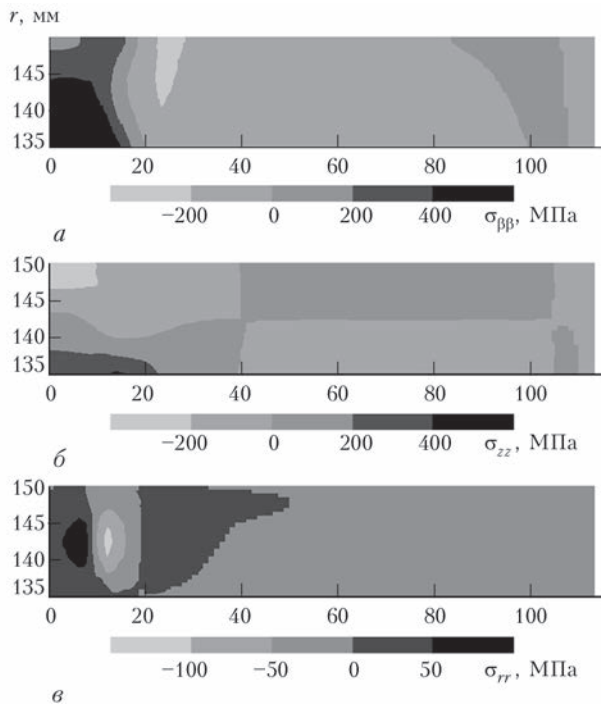


Рис. 3. Поля остаточных сварочных напряжений в области кольцевого монтажного соединения трубопроводного элемента, полученные посредством численного моделирования: а –  $\sigma_{\phi\phi}$ ; б –  $\sigma_{zz}$ ; в –  $\sigma_{rr}$

вым монтажным сварным швом. Свойства данной стали приведены, в частности, в работе [11], коэффициенты функции ползучести (3), (4) приняты следующими:  $n = 5$ ,  $G_c = -101069$ ,  $A = 1,4 \cdot 10^{30}$ . Были рассмотрены две характерные ситуации со-

стояния трубопровода в условиях высокотемпературной эксплуатации: бездефектный случай и при наличии в области кольцевого шва поверхностного коррозионно-эрозионного дефекта локального утонения стенки полуэллиптической формы (см. рис. 2). Для корректного учета влияния монтажа на остаточное состояние и работоспособность рассматриваемой конструкции было проведено моделирование кинетики физических процессов при сварке плавлением, что позволило получить распределение послесварочных напряжений в области неразъемного соединения (см. рис. 3), а также структурное и поврежденное состояния металла в области шва и зоны термического влияния.

Был проведен комплекс численных исследований особенностей накопления докритической поврежденности металла ТЭ с указанными выше параметрами в зависимости от условий эксплуатации, а также от его фактического состояния. Так, расчет развития равномерно распределенной пористости в условиях статического нагружения внутренним давлением показал характерную кинетику роста объемной концентрации несплошности  $f$  (рис. 4, а), которая соответствует имеющимся в литературе данным натурных измерений средствами акустической эмиссии. Как видно из приведенных результатов, рост внутреннего давления от 15 до 30 МПа существенно меняет склонность металла конструкции к докритическому повреждению (время эксплуатации до

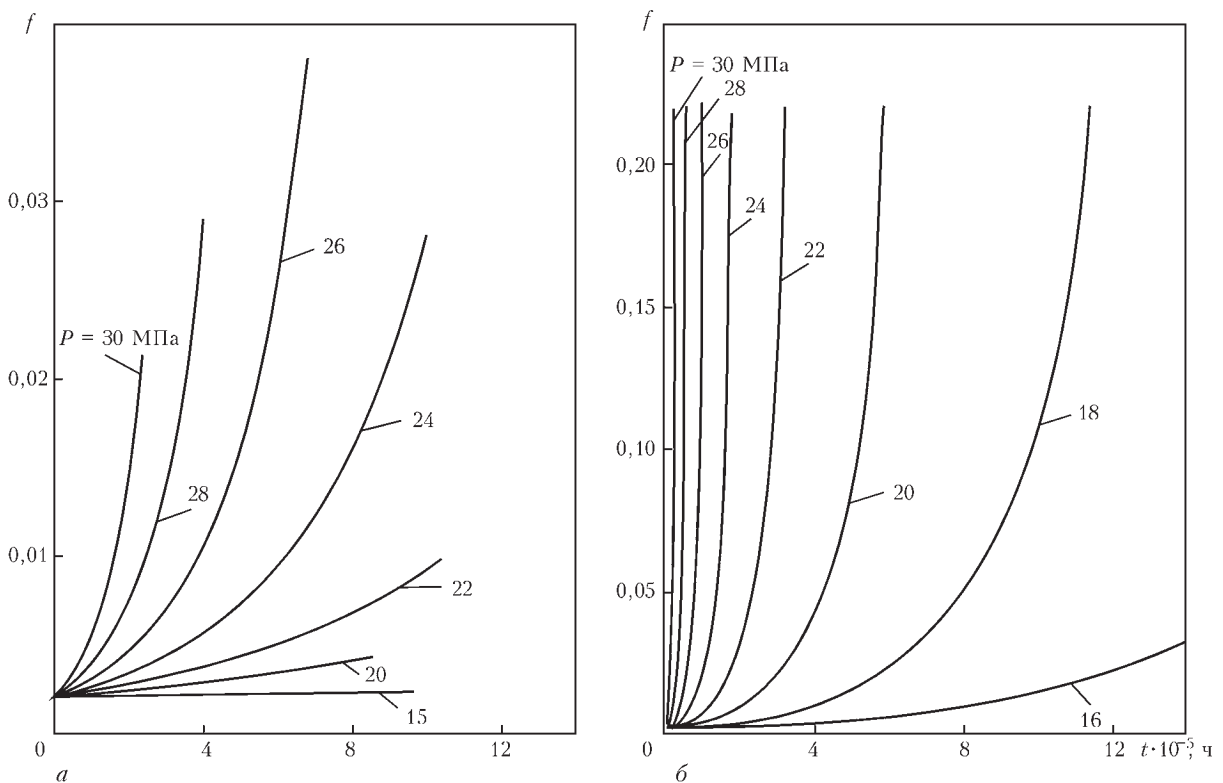


Рис. 4. Зависимость концентрации пор вязкого разрушения  $f$  от времени эксплуатации  $t$  трубопроводного элемента из стали 15Х2МФА ( $D \times \delta = 300 \times 15$  мм) для бездефектного случая (а) и при наличии дефекта локального утонения размером  $a \times 2s = 5 \times 100$  мм (б) при различных значениях внутреннего давления и температуре 650 °С

макроскопического разрушения  $t_k$  уменьшается более чем в три раза), что связано с более интенсивным пластическим деформированием по механизму высокотемпературной ползучести. Наличие дефекта локального утонения размером  $a \times 2s = 5 \times 100$  мм вызывает значительное увеличение интенсивности роста докритического повреждения металла трубопровода в результате формирования концентратора напряжений и соответствующего роста деформаций диффузионной ползучести (см. рис. 4, б). При этом, максимальная концентрация поврежденности материала бездефектного ТЭ характерно ниже, чем в случае конструкции с дефектом утонения, что объясняется локальностью разрушения в последнем случае: труба без выраженного концентратора напряжений получает практически равномерное по всему поперечному сечению повреждение (за исключением области сварного соединения), поэтому снижение несущей способности конструкции имеет место при большем давлении, но при меньшем максимальном  $f$ .

Аналогичное влияние на кинетику накопления докритической поврежденности металла ТЭ оказывает величина рабочего давления  $P$ , т. е. чем выше рабочее давление, тем меньшая концентрация равномерно распределенной поврежденности необходима для достижения предельного состояния конструкции (рис. 5). Это обусловлено тем, что при более высоких  $P$  для достижения предель-

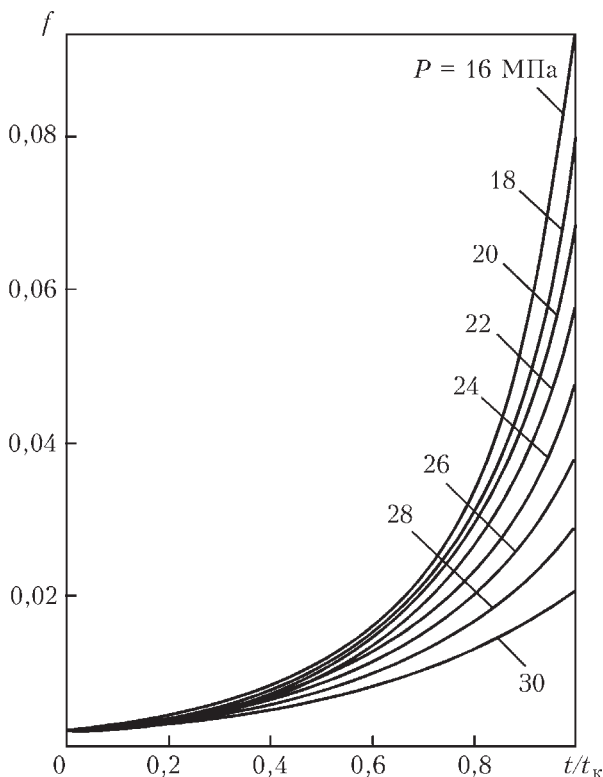


Рис. 5. Кинетика накопления докритической поврежденности металла трубопроводного элемента (без дефекта утонения стенки) при температуре 650 °С в координатах относительного времени  $t/t_k$

ных истинных напряжений (и соответствующих деформаций) необходимы меньшие значения величины фактического нетто-сечения конструкции.

С точки зрения применения данной методики при экспертизе состояния реальных конструкций важна оценка влияния размеров обнаруженных дефектов на их работоспособность. Применительно к сварным ТЭ с дефектами коррозионно-эрозийной природы разработанный подход позволяет с минимальной консервативностью оценивать время высокотемпературной эксплуатации с учетом фактических характеристик материала (параметров сопротивления различным видам разрушения) и развития деформаций ползучести. Так, применительно к указанному выше случаю участка трубопровода из стали 15Х2МФА с полуэллиптическим дефектом утонения глубиной  $a = 8$  мм в области кольцевого монтажного сварного соединения при температуре эксплуатации 650 °С и внутреннем давлении  $P = 8$  МПа изменение длины дефекта  $2s$  от 30 до 150 мм снижает время эксплуатации более чем в 3 раза (рис. 6). Глубина утонения в рассматриваемом случае еще более значительно влияет на предельное значение времени эксплуатации дефектного участка трубопровода  $t_k$  (см. рис. 7): в зависимости от внутреннего давления  $P$  величина  $t_k$  может снижаться на несколько порядков при увеличении длины дефекта с 2 до 11 мм ( $2s = 30$  мм, температура эксплуатации 650 °С). Из этого можно сделать вывод о том, что в условиях развитой ползучести размеры дефектов утонения более существенно влияют на остаточную прочность ТЭ в сравнении с низкотемпературными условиями эксплуатации, например, элементов магистральных трубопроводных систем, для которых предельное состояние обу-

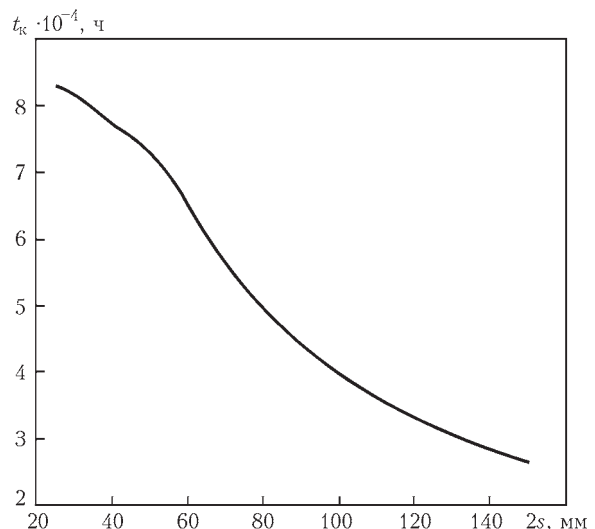


Рис. 6. Зависимость времени до макроскопического разрушения трубопроводного элемента  $t_k$  от длины дефекта утонения  $2s$  в области сварного шва (глубина дефекта  $a = 8$  мм, температура эксплуатации 650 °С)

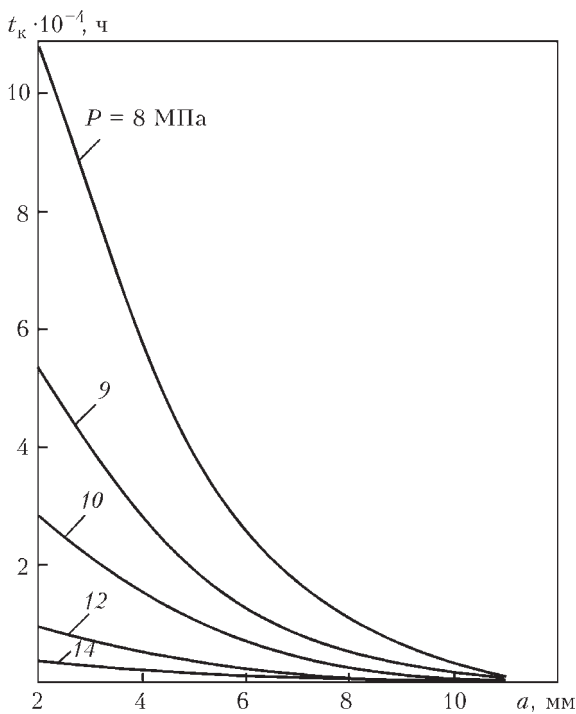


Рис. 7. Зависимости величины времени до макроскопического разрушения трубопроводного элемента  $t_k$  от глубины дефекта утонения  $a$  в области сварного монтажного шва при различных значениях внутреннего давления (длина дефекта  $2s = 30$  мм, температура эксплуатации  $650$  °C)

словлено интенсивностью деформаций мгновенной пластичности.

**Выводы**

1. Разработан комплекс моделей численного прогнозирования докритического повреждения материала сварных трубопроводных элементов в условиях высокотемпературной эксплуатации учитывающих особенности монтажной сварки, а также возможное наличие дефекта локального утонения стенки коррозионно-эрозионной природы. Предложен численный критерий предельного состояния конструкции в зависимости от системы нагрузок и степени микроскопической поврежденности материала, вызванной интенсивным деформированием по механизму мгновенной пластичности и ползучести.

2. На примере трубопровода из нержавеющей стали 15Х2МФА диаметром 300 мм, толщиной стенки 15 мм с кольцевым монтажным сварным швом исследованы характерные особенности текущего и предельного состояний трубопроводного элемента. Показано, что рост внутреннего давления от 15 до 30 МПа существенно меняет склонность металла конструкции к докритическому повреждению вследствие более интенсивного пластического деформирования по механизму высокотемпературной ползучести.

3. На основе результатов численных расчетов проанализировано влияние дефекта локального утонения стенки рассматриваемого трубопрово-

дного элемента на текущее и предельное поврежденное состояние конструкции. Показано, что в условиях развитой ползучести размеры дефектов утонения более существенно влияют на остаточную прочность трубопровода в сравнении с низкотемпературными условиями эксплуатации, например, элементов магистральных трубопроводных систем.

**Список литературы**

1. Jelwan J., Chowdhury M., Pearce G. (2013) Design for creep: A critical examination of some methods. *Engineering Failure Analysis*, **27**, 350–372.
2. Xue J.-L., Zhou C.-Y., Peng J. (2015) Ultimate creep load and safety assessment of P91 steel pipe with local wall thinning at high temperature. *International Journal of Mechanical Sciences*, **93**, 136–153.
3. Недосека А. Я., Недосека С. А., Смоголь Ю. А. и др. (2014) Длительная прочность материалов, работающих при высоких температурах, по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 17–21.
4. Wei Y., Zhang L., Au F. T. K. et al. (2016) Thermal creep and relaxation of prestressing steel. *Construction and Building Materials*, **128**, 118–127.
5. Lemaitre J., Desmorat R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag.
6. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
7. Xue L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 3343–3366.
8. Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Миленин А. С. и др. (2015) Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой. *Автоматическая сварка*, **1**, 22–27.
9. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. (1993) *Физико-механическое моделирование процессов разрушения*. Санкт-Петербург, Политехника.
10. Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Миленин А. С. и др. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, **9**, 26–31.
11. Неймарк Б. Е. (ред.) (1967) *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике*. Справочник. Москва–Ленинград, Энергия.

**Reference**

1. Jelwan, J., Chowdhury, M., Pearce, G. (2013) Design for creep: A critical examination of some methods. *Engineering Failure Analysis*, **27**, 350-372.
2. Xue, J.-L., Zhou, C.Y., Peng, J. (2015) Ultimate creep load and safety assessment of P91 steel pipe with local wall thinning at high temperature. *Int. J. of Mechanical Sci.*, **93**, 136-153.
3. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Smogol, Yu.A. et al. (2014) Long-term strength of materials operating at high temperatures by acoustic emission data. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 17-21 [in Russian].
4. Wei, Y., Zhang, L., Au, F.T.K. et al. (2016) Thermal creep and relaxation of prestressing steel. *Construction and Building Materials*, **128**, 118-127.
5. Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
6. Makhnenko, V.I. (2006) *Safe operating life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Xue, L. (2008) Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 3343-3366.

8. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2015) Evaluation of operability of the main pipeline with local wall thinning at repair by arc surfacing. *The Paton Welding J.*, **1**, 18-23 [in Russian].
9. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A. (1993) *Physical-mechanical modeling of fracture processes*. Saint-Petersburg, Politekhnikha [in Russian].
10. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2013) Modelling of processes of nucleation and development of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 24-29 [in Russian].
11. (1967) *Physical properties of steels and alloys applied in power engineering*. Ed. by B.E.Nejmarka. In: Refer.book. Moscow-Leningrad, Energiya [in Russian].

О. С. МІЛЕНІН, О. А. ВЕЛИКОІВАНЕНКО,  
Г. П. РОЗИНКА, Н. І. ПІВТОРАК

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м.Київ-150,  
вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

**МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ КОРОЗІЙНО-ЕРОЗІЙНИМИ ДЕФЕКТАМИ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Розроблено комплекс моделей чисельного прогнозування докритичного пошкодження та граничного стану зварних трубопровідних елементів в умовах високотемпературної експлуатації, що враховують особливості монтажного зварювання та наявність ізольованого дефекту локального стоншення стінки корозійно-ерозійної природи. На прикладі характерного трубопроводу з нержавіючої сталі досліджено особливості поточного та граничного станів зварних конструкцій в умовах розвинених деформацій повзучості. Показано вплив дефекту локального стоншення стінки трубопровідного елемента на закономірності докритичного

і макроскопічного пошкодження металу при складному температурно-силовому впливі. Бібліогр. 11, іл. 7.

Ключові слова: докритичне пошкодження, деформації повзучості, трубопровідний елемент, дефект стоншення стінки, граничний стан, чисельне прогнозування

A. S. MILENIN, E. A. VELIKOVANENKO,  
G. PH. ROZYINKA, N.I. PIVTORAK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazimir  
Malevich str., 03150, Kiev, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

**METHODOLOGY OF NUMERICAL PREDICTION OF SERVICEABILITY OF PIPELINE ELEMENTS WITH CORROSION-EROSION DEFECTS UNDER CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE OPERATION**

A complex of models of numerical prediction of subcritical damage and limiting state of welded pipeline elements under conditions of high-temperature operation, taking into account the features of site welding and the presence of an isolated defect of local wall thinning of the corrosion-erosive nature, was developed. The characteristics of current and limited state of welded structures under the conditions of propagated creep deformations were investigated using the example of a characteristic pipeline of stainless steel. The influence of a local wall thinning defect of a pipeline element on the regularities of subcritical and macroscopic metal damage was shown at a complex temperature-force action. 11 – Ref., 7 – Fig.

Keywords: subcritical damage, creep deformations, pipeline element, wall thinning defect, limited state, numerical prediction

Поступила в редакцію  
05.09.2017

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«Титан 2018: производство и применение в Украине»**

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 11–13 июня 2018 г.

Председатели программного комитета:  
академик Б. Е. Патон, проф. В. А. Богуслаев



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ  
АО «Мотор Сич»  
Запорожский национальный технический университет  
Международная Ассоциация «Сварка»



**Тематика конференции**

- Применение изделий и конструкций из титановых сплавов в авиа-двигателестроении и других отраслях промышленности.
- Литейные технологии.
- Аддитивные технологии в производстве изделий из титановых сплавов.
- Новые сплавы на основе титана и его интерметаллидных соединений.
- Прогрессивные технологии и оборудование для получения слитков титана и сплавов на его основе.
- Деформационная обработка титана.
- Структура и свойства титановых сплавов.
- Прогрессивные технологии сварки и пайки изделий из титановых сплавов.

Подача заявок для участия в конференції и отправка докладов до 15 марта 2018 г.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, отд. № 51,  
ул. Казимира Малевича, 11,  
г. Киев, 03680, Украина.  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, 205-22-98  
E-mail: journal@paton.kiev.ua, lanagrig@gmail.com  
www.pwi-scientists.com/rus/titan2018



Информационная поддержка – журналы  
«Автоматическая сварка»  
и «Современная электрометаллургия».

# РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ТОВЩИНИ СТІНКИ ТРУБОПРОВОДІВ АЕС ПРИ ЕРОЗІЙНО-КОРОЗІЙНОМУ ЗНОШУВАННІ МАТЕРІАЛУ\*

І. В. ОРИНЯК, А. Я. КРАСОВСЬКИЙ, М. В. БОРОДІЙ, С. М. АГЕЄВ

Ін-т проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ-14, вул. Тимирязевська, 2. E-mail: info@ipp.kiev.ua

Розроблено методи оцінки залишкової міцності елементів трубопроводів (прямих труб і Т-подібних трійникових з'єднань) з дефектами, що спираються на статичну теорему граничного навантаження теорії пластичності. З метою підтвердження коректності запропонованих методів проведено серію повномасштабних випробувань до руйнування елементів трубопроводів з поверхневими надрізами. Запропоновано узгоджену з нормами на проектування методику визначення допустимої товщини елементів трубопроводів з вуглецевих сталей АЕС України, що пошкоджені ерозійно-корозійним зношуванням. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 10.

*Ключові слова:* трубопровід; дефект; ерозійно-корозійне зношування; граничне навантаження в'язкого руйнування

Ерозійно-корозійне зношування (ЕКЗ) трубопроводів і обладнання другого контуру, виготовлених з вуглецевих сталей, є одним з найбільш розповсюджених факторів пошкодження на атомних електростанціях. Найчастіше такі пошкодження на заключній стадії призводять до виникнення свищів, проте в практиці експлуатації АЕС мали місце також серйозні руйнування, викликані ЕКЗ, наприклад на трубопроводі живильної води енергоблоку № 2 АЕС «Саррі» (США) у 1986 р., а також аварії на енергоблоці № 1 АЕС Ловіса (1993 р.), Калининської АЕС (2004 р.), Балаковської АЕС (2004 р.). Решта випадків пошкоджень ЕКЗ на АЕС з реакторними установками типу ВВЕР описані в роботах [1, 2] та ін.

Явище ЕКЗ залежить від багатьох факторів. Його механізми до кінця не з'ясовані та є предметом широкого обговорення спеціалістів. Про різноманіття факторів, що впливають на інтенсивність ЕКЗ, свідчать створені в різних країнах методичні та програмні засоби для оцінки ЕКЗ, які акцентують увагу на такому [3]:

- проектні характеристики та експлуатаційні параметри (діаметр трубопроводного елементу та його конструкція – згин, трійник, перехідник тощо; температура та швидкість теплоносія; вологість пари (для паропроводів);
- показники водно-хімічного режиму (значення рН, концентрація кисню в теплоносії тощо);
- хімічний склад металу трубопроводу (вміст у металі хрому, міді та молібдену) та його фізико-хімічні характеристики;
- тривалість експлуатації трубопроводу.

Зазвичай в процесі ЕКЗ відбувається стоншення стінок в одних місцях трубопроводу (шляхом зносу матеріалу труби) та потовщення в інших (шляхом відкладення продуктів корозії на стінці труби). Місцеві стоншення призводять до порушення умов міцності, потовщення – до ускладнення умов течії середовища.

Подовження ресурсу обладнання АЕС залежить від обґрунтованості проектних методів розрахунку і виконання регламентних процедур технічного обслуговування. Проте оскільки документи на проектування не передбачають аналізу дефектів, що можуть виникнути від різних механізмів пошкодження на етапі експлуатації, то виникає необхідність у створенні нормативних документів «відповідності за призначенням» (ВЗП), що дозволяють оцінювати небезпеку дефектів з урахуванням результатів періодичного контролю навантаженості, вивчення механізмів деградації металу, виявлення дефектів тощо. Вимогою до документів ВЗП (наприклад у роботах [4, 5]) є їх погодженість з нормами на проектування, що передбачає використання єдиних значень допустимих характеристик матеріалу і єдиної системи коефіцієнтів запасу міцності. При цьому передбачається використання однакових категорій напружень, режимів експлуатації і критеріїв граничного стану матеріалу, які встановлюються нормами на проектування.

Для атомної енергетики України з метою уніфікації методів боротьби з ЕКЗ виникла потреба у створенні Єдиної методики кількісної оцінки небезпеки розрахункових або фактичних (за результатами обстежень) ЕКЗ пошкоджень еле-

\*За матеріалами роботи, що виконана в рамках цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» за останні роки ([www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations)).

ментів трубопроводів, тобто методики визначення допустимої товщини елементів трубопроводів з вуглецевих сталей АЕС, яка дасть можливість обґрунтовано підходити до оцінювання результатів експлуатаційного контролю за умови допуску трубопроводу з дефектом ЕКЗ в експлуатацію до наступного експлуатаційного контролю з обов'язковим підтвердженням такої можливості розрахунковим шляхом. Методика дозволить розширити можливості вітчизняної нормативної бази [6] і суттєво підтримати виробничі підрозділи АЕС у прийнятті рішень щодо допуску трубопроводу з дефектом ЕКЗ в експлуатацію до наступного експлуатаційного контролю.

Створенню методики передують вирішення двох головних завдань:

- розробка науково обґрунтованих методів оцінки залишкової міцності елементів трубопроводів з дефектами;
- узгодженість методики з нормами на проектування, зокрема використання однакових категорій напружень, критеріїв граничного стану, єдиної системи коефіцієнтів запасу міцності тощо.

З урахуванням вказаного мета роботи полягає в розробці методів оцінки граничного пластичного стану прямої труби з поздовжнім поверхневим дефектом; розробці методів оцінки граничного пластичного стану прямої труби з поперечним поверхневим дефектом; розробці методів оцінки граничного пластичного стану Т-подібного трійникового (патрубкового) з'єднання з поздовжнім поверхневим дефектом основної труби; експериментальному підтвердженні запропонованих методів шляхом проведення серії повномасштабних випробувань внутрішнім тиском (моментом згину) до руйнування відповідних елементів трубопроводів з поверхневими дефектами; реалізації розроблених методів оцінки залишкової міцності елементів трубопроводів з дефектами в Методиці визначення допустимої товщини елементів трубопроводів з вуглецевих сталей АЕС України.

**Розробка методів оцінки граничного пластичного стану елементів трубопроводів з дефектами.** При розрахунку дефектних трубопроводів зазвичай розглядають ідеалізовані дефекти, орієнтовані вздовж (поздовжні) і поперек (поперечні) їх осі.

Для трубопроводів з поздовжніми дефектами в пластичних металах в основному використовують емпіричні формули [7], побудовані за результатами експерименту, або чисельні рішення, отримані методом скінчених елементів (МСЕ). Недоліком таких підходів є невизначеність щодо їх подальшого застосування в умовах, що відрізняються від експериментальних чи розрахункових. Крім того, в існуючих комерційних комплексах МСЕ немає готових універсальних процедур розрахунків для

випадку ідеально пластичної поведінки тіла або для дуже великих пластичних деформацій.

Як альтернативу можна розглянути розроблені в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України аналітичні підходи [8], основані на моделюванні граничного пластичного стану тонкостінної труби в околі дефекту. Вони дають зрозумілі механізми і природу руйнування, проте не враховують вплив радіальних напружень, рівень яких зростає із збільшенням відношення товщини стінки до радіуса труби. Крім того, практично не досліджували вплив розташування дефекту (внутрішня або зовнішня поверхня труби) головним чином через відсутність експериментальних даних, що пов'язано з труднощами при нанесенні дефектів на внутрішню поверхню труби.

Оцінка залишкової міцності трубопроводів з поперечними дефектами виконується за теоретично обґрунтованим критерієм руйнування нетто-перерізу, що базується на статично можливому розподілі напружень, при якому в кожній точці дефектного поперечного перерізу напруження досягають граничного значення, а в цілому напруження врівноважують прикладений момент і осьову силу [9].

Разом з тим при розрахунку таких трубопроводів залишаються принципові проблеми. Існуючі підходи не враховують характерного для труби з поперечним дефектом комбінованого навантаження внутрішнім тиском, моментом згину та осьовою силою. Крім того, існуючі методи не враховують обмеженої здатності реальних тіл опиратися пластичним деформаціям, що не дозволяє пояснити різницю між «локальним» та «глобальним» руйнуваннями, а отже, неможливо зрозуміти причину реалізації явища течі (прорив тільки нетто-зв'язки) або руйнування (розрив металу, що призводить до збільшення довжини тріщини).

Методи оцінки залишкової міцності Т-подібних трійникових (патрубкових) з'єднань з дефектом основної труби в літературі практично відсутні, а експериментальні дослідження взагалі не проводились. Разом з тим в нормативних документах, зокрема в роботі [4], пропонують тривіальні підходи, що не дозволяють проводити обґрунтовані оцінки. Існуючий у вітчизняних нормах на проектування [6] розрахунок коефіцієнтів зниження міцності, підкріплених і непідкріплених циліндричних оболонки, ослаблених отворами під патрубок, не передбачає проведення відповідного аналізу за наявності дефекту.

*Моделювання граничного пластичного стану товстостінної труби з поздовжнім поверхневим дефектом постійної глибини.* Модель оцінки граничного пластичного стану товстостінної труби з поздовжнім поверхневим дефектом [10] ґрунтується на відповідній моделі тонкостінної

труби [8] та спирається на статичну теорему теорії пластичності щодо нижньої границі в'язкого руйнування – ідеальне пружно-пластичне тіло, що знаходиться в статичній рівновазі, під дією монотонного навантаження не руйнується, якщо умова міцності задовольняється в кожній точці. Детальна модель описана в роботі [10].

Досліджено вплив розташування поверхневої тріщини (внутрішня або зовнішня поверхня труби) на її залишкову міцність головним чином через труднощі нанесення тріщини прямокутного профілю на внутрішню поверхню. Встановлено, що розташування тріщини впливає перш за все на граничні значення моментів згину, оскільки приrost прикладених моментів визначається геометричними характеристиками тріщини. На основі теорії міцності Тріска показано, що розташування тріщини на внутрішній поверхні труби призводить до взаємодії додатних окружних і осьових напружень, що збільшує граничний момент згину в зоні тріщини  $[M_x(0)]$  у півтора рази по відношенню до труби з зовнішньою тріщиною, для якої характерна взаємодія додатних окружних і від'ємних осьових напружень.

Основною проблемою при аналізі товстостінності є вплив радіальних напружень. Зміна поперечних сил  $Q_x$  на ділянці  $I$  для тонкостінної і товстостінної труби внутрішнім радіусом  $R_1$  та товщиною стінки  $t$ , навантаженої внутрішнім тиском  $P$  з тріщиною глибиною  $a$  на зовнішній поверхні (рис. 1), представлена такими формулами:

$$dQ_x/dx|_I = P - \sigma_b(t - a)/R_1 \quad (1)$$

$$dQ_x/dx|_I = P - \sigma_b \ln(R_a/R_1) - \Delta P. \quad (2)$$

Тут  $\sigma_b$  – границя міцності.

Оскільки верхня частина дефектного поперечного перерізу труби відповідно до модельних уявлень знаходиться в граничному стані від окружних і радіальних напружень, очевидно, що його нижня (бездефектна) частина перерізу своєї несучої здатності ще не вичерпала та здатна приймати додаткову частину внутрішнього тиску  $\Delta P$ , що створює силу та момент. Для визначення  $\Delta P$  використано відоме рівняння Гіркмана, що дає допустиму комбінацію осьових сил і моментів згину в перерізі.

Використовуючи умову граничного стану

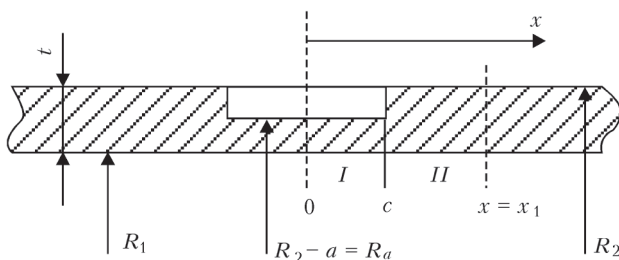


Рис. 1. Осьовий переріз труби з тріщиною на зовнішній поверхні

$$\Delta M_{appl} \Big|_0^{x_1} = [M_x(x_1)] - M_x(0) \quad (3)$$

де  $\Delta M_{appl} \Big|_0^{x_1}$  – прикладений момент, що визначається шляхом інтегрування зміни поперечних сил  $Q$  на ділянці від 0 до  $x_1$ , знайдено формули для розрахунку коефіцієнтів зменшення міцності товстостінної труби з поздовжньою поверхневою тріщиною відповідно на зовнішній та внутрішній поверхнях:

$$\bar{\alpha}_{out} = (1 + 2\lambda^2 a_{out} b_{out}) / (1 + 2\lambda^2 b_{out}), \quad (4)$$

$$\bar{\alpha}_{in} = (1 + 4\lambda^2 a_{in} b_{in} / 3) / (1 + 4\lambda^2 b_{in} / 3), \quad (5)$$

де для зручності представлення результатів вводяться поняття  $\alpha_{out} = \alpha_{in} = P / (\sigma_b \ln(R_2/R_1))$ ,  $a_{out} = (\ln(R_a/R_1 + \Delta P/\sigma_b)) / \ln(R_2/R_1)$ ,  $a_{in} = (\ln(R_2/R_a + \Delta P/\sigma_b)) / \ln(R_2/R_1)$ ,  $b_{out} = R_1(\ln(R_2/R_1) - \ln(R_a/R_1) - \Delta P/\sigma_b)t$  та  $b_{in} = R_1(\ln(R_2/R_1) - \ln(R_2/R_a - \Delta P/\sigma_b))t$ ,  $\lambda = c / \sqrt{R_1 t}$  – відносна половина довжини тріщини. Показано, що при  $\lambda \rightarrow 0$   $\alpha_{out} \rightarrow 1$  та  $\alpha_{in} \rightarrow 1$ , що відповідає сутності поняття коефіцієнт послаблення.

Розрахунок за допомогою запропонованих аналітичних формул (4), (5) зводиться до ітераційної процедури з використанням методу поділу відрізка навпіл [10].

Зіставлення результатів теоретичних розрахунків у відповідності з моделями (4), (5) та літературних даних випробувань до руйнування внутрішнім тиском товстостінних труб з дефектами на внутрішній та зовнішній поверхні, показало їх добру відповідність [10].

Моделювання граничного пластичного стану товстостінної труби з поперечним поверхневим дефектом складного профілю. На основі відомої моделі граничного пластичного стану NSC [9], яка передбачає, що всі точки нетто-перерізу труби знаходяться в граничному стані, в роботі [11] запропоновано універсальний чисельний алгоритм («глобальний» розв'язок) визначення довідкових напружень  $\sigma_{ref}$  товстостінної труби з поперечною тріщиною складного профілю (рис. 2) глибиною  $a = f(\varphi)$  в умовах комбінованого навантаження внутрішнім тиском  $P$ , осьовою силою  $N$  та моментом згину  $M$ . Процедура зводиться до знаходження кута  $\varphi_0$  – границі між додатним  $\sigma^+ = \sigma_{ref}$  та від'ємним  $\sigma^- = \sigma^+(1 - p)$  (відповідно до теорії Тріска) розподілом напружень та довідкових напружень  $\sigma_{ref}$ . Тут  $p = PR/(\sigma^+ t)$  – безрозмірний внутрішній тиск;  $R$  – середній радіус труби;  $t$  – товщина стінки.

На відміну від процедури встановлення  $\sigma_{ref}$  труби з тріщиною постійної глибини, в якій кут  $\varphi_0$  визначається аналітично, для труби з тріщиною складного профілю його знаходять за допомогою ітераційної процедури. Для цього з інтегрального рівняння рівноваги



сил в осьовому напрямку труби визначають  $N_{lower}$  при  $(\varphi_0)$  та  $N_{upper}$  при  $(\varphi_0)_{upper} = \pi$ . Якщо  $N < N_{lower}$  або  $N > N_{upper}$ , то довідкові напруження збільшують  $\sigma_{ref}^{lower} = \sigma_{ref}^m = 0,5(\sigma_{ref}^{lower} + \sigma_{ref}^{upper})$ . У випадку  $N_{lower} < N < N_{upper}$  з урахуванням  $(\varphi_0)_m = 0,5((\varphi_0)_{lower} + (\varphi_0)_{upper})$  передбачено знаходження гранично можливого значення осьової сили  $N_m$

$$N_m = 2\sigma^+ Rt \int_0^{(\varphi_0)_m} d\varphi - 2\sigma^+(1-p)Rt \times \int_{(\varphi_0)_m}^{\pi} d\varphi - 2\sigma^+ Rt \int_0^{\psi} a(\varphi)d\varphi \quad (6)$$

де  $t_n(\varphi) = t - a(\varphi)$ . Якщо  $N_m > N$ , то приймають  $(\varphi_0)_{upper} = (\varphi_0)_m$ , інакше  $(\varphi_0)_{lower} = (\varphi_0)_m$ . Процедура визначення  $\varphi_0$  передбачає 14 ітерацій, що дає похибку 0,01 %. Наступний крок процедури – перевірка умови міцності:

$$M_m = 2\sigma^+ R^2 \int_0^{(\varphi_0)_m} t_n(\varphi)\cos\varphi d\varphi - 2\sigma^+(1-p)R^2 t \times \int_{(\varphi_0)_m}^{\pi} \cos\varphi d\varphi + 2\sigma^+(1-p)R^2 \int_{(\varphi_0)_m}^{\psi} a(\varphi)\cos\varphi d\varphi \quad (7)$$

Якщо  $M_m > M$ , то довідкові напруження зменшують  $\sigma_{ref}^{upper} = \sigma_{ref}^m$ , інакше  $\sigma_{ref}^{lower} = \sigma_{ref}^m$ .

Формули (6), (7) справедливі для випадку  $\varphi_0 < \psi$ , коли частина тріщини одночасно знаходиться в умовах напружень розтягу  $\sigma^+$  та стиску  $\sigma^-$ . При розташуванні тріщини в зоні дії тільки додатних напружень ( $\varphi_0 > \psi$ ) формули для  $N_m$  та  $M_m$  знаходять аналогічно,

Інтеграли (6), (7) визначаються чисельно, що дозволяє враховувати будь-який профіль поперечної тріщини.

Запропонована процедура визначення  $\sigma_{ref}$  («глобальний» розв’язок) є типовим прикладом побудови статично можливого розв’язку. Відзначимо парадокс таких рішень. З одного боку, як наслідок теореми про статично можливий розв’язок теорії пластичності формально вони повинні давати оцінку знизу, а з іншого, – вони не враховують переміщень і деформацій точок тіла, а значить, і обмежену здатність реальних тіл опиратися пластичним деформаціям, що призводить до переоцінки несучої здатності.

На основі представленого в роботі [11] схематичного аналізу деформування труби з поперечною тріщиною сформульовано критерії реалізації «глобального» розв’язку при великій ширині поверхневого дефекту; при тріщиноподібному поверхневому дефекті тільки у випадку дуже великої тріщиностійкості металу, вираженої в термінах розкриття тріщини  $\delta$  для труб невеликого діаметру; для наскрізної тріщини  $a \equiv t$ .

Враховуючи, що для реальних поперечних тріщин в трубах «глобальний» розв’язок може виявитися неконсервативним, в роботі [11] запропоновано «локальний» розв’язок, оснований на симетричному розподілі деформацій у верхній і нижній частинах дефектного перерізу труби шляхом введення уявної симетричної тріщини відносно осі  $x$ , що призводить до «вирівнювання» деформацій верхньої і нижньої частин перерізу та, порівняно з реальною тріщиною, підвищує розрахункові оцінки  $\sigma_{ref}$ . «Локальна» процедура знаходження  $\sigma_{ref}$  для труби з тріщиною складного профілю аналогічна «глобальній». Розроблені «глобальний» та «локальний» розв’язки дозволяють обґрунтувати фізичну суть явища «теча перед руйнуванням». Результати розрахунків за «глобальним» та «локальним» розв’язками зіставлені з даними випробування прямих труб з поперечним дефектом напівеліптичного профілю, навантажених моментом згину [11].

Моделювання граничного пластичного стану T-подібного трійникового (патрубкового) з’єднання з позовжнім поверхневим дефектом основної труби. Бездефектне T-подібне патрубкове з’єднання, не підсилене патрубковою трубою, являє собою пряму трубу з наскрізним отвором. Основна відмінність моделі граничного стану прямої труби з наскрізним дефектом від моделі труби з поверхневим [8] полягає в тому, що дотична сила  $L \neq 0$ , а значить, дотичною силою  $Q_\varphi$  в рівняннях рівноваги сил в радіальному напрямку нехтувати неможна. Наявність дотичної сили  $L \neq 0$  призводить до перерозподілу окружної сили  $N_\varphi$  в залежності від кутової координати  $\varphi$  поперечного перерізу труби. Це в свою чергу впливає на розподіл поперечних зусиль  $Q_x$ , тобто відбувається їх зменшення (рис. 3). Врахуємо згаданий перерозподіл окружної сили  $N_\varphi$  для труби з наскрізним дефектом шляхом введення безрозмірної фіктивної нетто-товщини стінки  $z$  в зоні дефекту при  $0 < z \leq 1$ . Зміна поперечних зусиль  $Q_x$  на ділянці  $l$  довжиною  $s$  матиме такий вигляд:

$$dQ_x/dx|_l = \sigma_b t(\alpha_1 - z)/R_1. \quad (8)$$

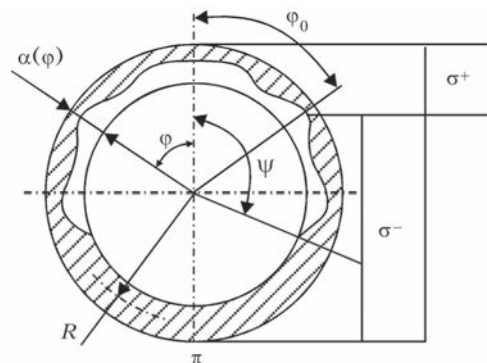


Рис. 2. Осьовий переріз труби з поперечним дефектом складного профілю ( $\varphi_0 < \psi$ )

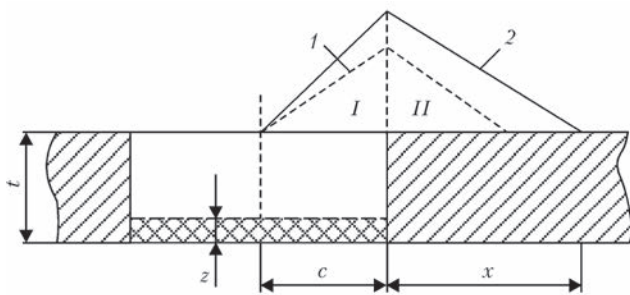


Рис. 3. Розподіл поперечних зусиль  $Q_x$  в прямій трубі з наскрізним (1) при  $(L \neq 0)$  та поверхневим (2) при  $L = 0$  дефектом

Враховуючи процедуру знаходження граничного тиску, описану в роботах [8, 10], вираз для безрозмірного коефіцієнту зменшення міцності  $\alpha$  прямої труби з наскрізним дефектом без урахування зміцнення патрубковою трубою матиме вигляд

$$\alpha_1 = PR_1 / (\sigma_b t) = [1 + 2\lambda_1^2 z(1 - z)] / [1 + 2\lambda_1^2 (1 - z)], \quad (9)$$

де  $\lambda_1 = c / \sqrt{R_1 t}$  безрозмірна половина довжини поверхневого дефекту;  $2c$  – довжина дефекту (діаметр отвору).

Введена в розгляд залишкова товщина стінки  $z$  знаходиться з умови рівності коефіцієнту зменшення міцності  $\alpha_1$  коефіцієнту  $\alpha_{\text{Battelle}}$  для наскрізного дефекту, що у відповідності з документом [4] визначається таким чином:

$$\alpha_{\text{Battelle}} = (1 + 0,379\lambda_B^2 - 0,001236\lambda_B^4)^{-0,5}, \quad (10)$$

де  $\lambda_B = 1,818c / \sqrt{R_1 t}$  – безрозмірна довжина наскрізного дефекту.

Зауважимо, що знайдена таким чином фіктивна залишкова товщина стінки  $z$  визначає умовну границю між «глобальним» і «локальним» (течія) руйнуваннями.

Бездефектне Т-подібне патрубкове з'єднання, зміцнене патрубковою трубою, підсилює наскрізний дефект (в даному випадку – отвір) через створену так звану нетто-зв'язку, здатну сприймати частину окружних зусиль  $N_\phi$ . Зауважимо, що патрубкова труба підсилюватиме основну трубу, ослаблену наскрізним отвором тільки у випадку, коли її міцність більша за залишкову міцність основної труби. Знайдемо ефект підсилення – додатковий безрозмірний коефіцієнт зменшення міцності  $\Delta\alpha_2$ . Враховуючи розподіл поперечних зусиль для даного випадку

$$Q_x(x) = \Delta\alpha_2 \sigma_b t + (P - \sigma_b t / R_1)x. \quad (11)$$

Остаточний вираз для додаткового коефіцієнта зменшення міцності матиме вигляд

$$\Delta\alpha_2 = (t_{II} / t) \sqrt{(0,5t_{II} / r)(1 - \alpha_2 r t / (t_{II} R_1))}, \quad (12)$$

де  $t$  – товщина стінки основної труби;  $t_{II}$  – товщина стінки патрубкової труби;  $r$  – внутрішній радіус патрубкової труби;  $x$  – осьова координата правої межі граничної області (рис. 3).

З урахуванням формул (9) та (12) вираз для коефіцієнту зменшення міцності  $\alpha_2$  прямої труби з наскрізним отвором, підсиленою патрубковою трубою, матиме вигляд

$$\alpha_2 = [1 + 2\lambda_1^2 (z + \Delta\alpha_2)(1 - z - \Delta\alpha_2 L_2)] / [1 + 2\lambda_1^2 (1 - z - \Delta\alpha_2)]. \quad (13)$$

Коефіцієнт  $\alpha_2$  з урахуванням рівнянь (12), (13) знаходиться за допомогою ітераційної процедури.

Т-подібне патрубкове з'єднання з поздовжнім поверхневим дефектом основної труби дозволяє знайти граничне навантаження Т-подібного патрубкового з'єднання з поздовжніми поверхневими дефектами, симетрично розташованими відносно осі патрубкової труби (рис. 4). Зміна поперечних сил  $Q_x$  на кожній з трьох ділянок основної труби (рис. 4) матиме вигляд

$$\begin{aligned} dQ_x/dx|_I &= \sigma_b t(\alpha_3 - z - \Delta\alpha_3) / R_1, \\ dQ_x/dx|_{II} &= \sigma_b t(\alpha_3 - \tau) / R_1, \\ dQ_x/dx|_{III} &= \sigma_b t(\alpha_3 - 1) / R_1, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $\alpha_3$  – безрозмірний коефіцієнт зменшення міцності Т-подібного патрубкового з'єднання з симетричними поздовжніми поверхневими дефектами;  $\Delta\alpha_3$  – додатковий безрозмірний коефіцієнт зменшення міцності;  $\tau = 1 - (a / t)$  – безрозмірна залишкова товщина нетто-перерізу в зоні поверхневого дефекту глибиною  $a$  (ділянка II).

Максимальне значення прикладеного моменту  $\Delta M_{\text{appl}}|_0^x$  знаходиться як сума приростів моментів на трьох ділянках  $M_I$ ,  $M_{II}$  та  $M_{III}$

$$\begin{aligned} M_I &= \sigma_b t c^2 (\alpha_3 - z - \Delta\alpha_3) / 2R_1, \\ M_{II} &= \sigma_b t b c (\alpha_3 - z - \Delta\alpha_3) / R_1 + \sigma_b t b^2 (\alpha_3 - \tau) / 2R_1, \\ M_{III} &= \sigma_b t c x (\alpha_3 - z - \Delta\alpha_3) / R_1 + \sigma_b t b x (\alpha_3 - \tau) / R_1 + \\ &\quad + \sigma_b t x^2 (\alpha_3 - 1) / 2R_1, \end{aligned} \quad (15)$$

де  $b$  – довжина поздовжнього поверхневого дефекту. Координата правої межі  $x$  граничної області знаходиться з умови  $Q_x \geq 0$ , що відповідає зростанню прикладеного моменту згину  $M_x$ :

$$x = [(\alpha_3 - z - \Delta\alpha_3)c + (\alpha_3 - \tau)b] / (1 - \alpha_3). \quad (16)$$

З використанням умови граничного стану (3) та значення граничних згинальних моментів  $[M_x(x_1)] = [M_x(0)] \approx 0,5\sigma_b t^2 / 4$  у відповідності з ро-

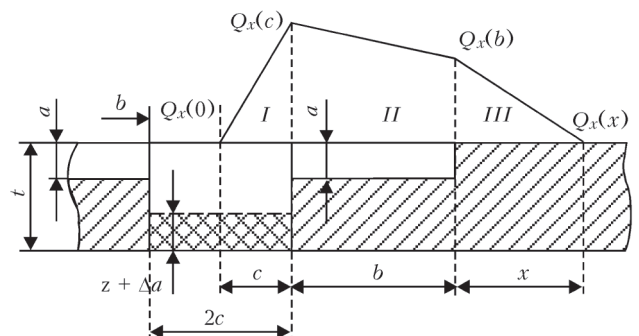


Рис. 4. Розподіл поперечних зусиль  $Q_x$  в Т-подібному патрубковому з'єднанні з поздовжніми поверхневими дефектами, симетрично розташованими відносно осі патрубкової труби

ботою [8] знайдемо вираз для коефіцієнта  $\alpha_3$  Т-подібного патрубкового з'єднання з поздовжнім поверхневим дефектом основної труби:

$$\alpha_3 = \frac{1 + 4\lambda_1\lambda_2(z + \Delta\alpha_3)(1 - \tau) + 2\lambda_1^2(z + \Delta\alpha_3) \times \dots}{1 + 4\lambda_1\lambda_2(1 - \tau) + 2\lambda_1^2(1 - z - \Delta\alpha_3) + \dots} \times \frac{\dots}{\dots + 2\lambda_2^2(1 - \tau)} \quad (17)$$

де  $\lambda_2 = b / \sqrt{R_1 t}$  – безрозмірна довжина поздовжнього поверхневого дефекту. Підсилення патрубковою трубою визначається аналогічно виразу (12):

$$\Delta\alpha_3 = (t_{II} / t) \sqrt{(0,5t_{II} / r)(1 - \alpha_3 r t / (t_{II} R_1))}. \quad (18)$$

При Т-подібному патрубковому з'єднанні з поздовжнім поверхневим дефектом основної труби, тобто коли поверхневий дефект розташований з одного боку від патрубкової труби, має місце зсув епюри розподілу поперечних сил  $Q_x$  в бік поздовжнього дефекту. Нехай нульова точка  $Q_x$  ( $x = 0$ ) зсувається на деяку відстань  $\mu c$ , де  $c$  – радіус отвору під патрубкову трубу (зовнішній радіус патрубкової труби), а  $\mu > 0$ .

Визначення граничного пластичного стану в такому випадку відбувається за допомогою ітераційної процедури. Використовуючи формулу (13) та приймаючи  $\lambda_1 = (c + \mu c) \sqrt{R_1 t}$  і  $\lambda_B = 1,818 (c + \mu c) / \sqrt{R_1 t}$ , визначають коефіцієнт  $\alpha_2$ , що відповідає бездефектній частині патрубкового з'єднання. За аналогічного значення  $\mu$  у відповідності з формулою (17) з урахуванням  $\lambda_1 = (c - \mu c) \sqrt{R_1 t}$  і  $\lambda_B = 1,818 (c - \mu c) / \sqrt{R_1 t}$  встановлюють значення коефіцієнту  $\alpha_3$  для дефектної частини з'єднання. Таким чином, шляхом підбору значень  $\mu$  за певну кількість ітерацій досягають граничного пластичного стану, коли залишкова міцність бездефектної частини з'єднання дорівнює відповідній міцності дефектної, тобто  $\alpha_2 = \alpha_3$ .

**Експериментальна верифікація моделей.**

З метою експериментального підтвердження запропонованих моделей граничного пластичного стану проведено серію повно масштабних випробувань внутрішнім тиском (моментом згину) до руйнування елементів трубопроводів з поверхневими дефектами. Випробування проведено в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.

Випробування внутрішнім тиском прямих труб з поздовжніми поверхневими надрізами. Об'єкт випробування – прямі труби (сім зразків) зовнішнім діаметром  $D = 194$  мм та товщиною стінки  $t = 9$  мм, довжиною  $L = 1000$  мм, до обох торців яких приварено плоскі донця. Матеріал труб – Ст20. Поверхневі надрізи (табл. 1) наносились дисковою фрезою діаметром 80 мм, товщиною 3 мм та кутом заточки 45°.

**Таблиця 1.** Геометричні характеристики поздовжніх поверхневих надрізів труб для випробування внутрішнім тиском

№ труби	Глибина надрізу $a$ , мм	Довжина надрізу $l$ , мм
1	7,4	64
1a		119
2	6,6	64
4		119
5		37
3	5,8	64
3a		119

Методика випробування полягала в наступному. Попередньо заповнені на 100 % об'єму водою дефектні труби навантажуються до руйнування внутрішнім тиском повітря. В режимі реального часу відбувається реєстрація значень внутрішнього тиску та розкриття берегів надрізу.

Розміри надрізів вибрано таким чином, щоб за результатами випробувань отримати два види втрати несучої здатності трубних зразків: «теча» – проростання поверхневої тріщини до наскрізної з подальшою зупинкою її розвитку; «руйнування» – проростання поверхневої тріщини до наскрізної, що супроводжується збільшенням її розмірів у поздовжньому та поперечному напрямках. Це дозволить обґрунтувати умовну границю (рис. 5) між «течею» та «руйнуванням», яку визначено з умови рівності залишкової міцності труби з поверхневим дефектом  $\alpha_{II} = (1 + 2\lambda^2\tau(1 - \tau)) / (1 + 2\lambda^2(1 - \tau))$  [8] та труби з наскрізним  $\alpha_{II} = (1 + 1,61\lambda^2)^{-0,5}$  [4]. Тут  $\lambda = 0,5l \sqrt{R_1 t}$  – безрозмірна довжина дефекту;  $R_1$  – внутрішній радіус труби;  $\tau = t_{II} / t$  – безрозмірна залишкова товщина стінки;  $t_{II} = t - a$  – залишкова товщина стінки.

Результати зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними представлено в табл. 2, де  $P_{експ}$  – значення тиску руйнування, отримане за результатами експерименту;  $\alpha$  – коефіцієнт зменшення міцності;  $l$  – граничний тиск (тиск руйнування);  $\sigma_{ref}$  – довідкові напруження:

$$\alpha_{Battelle} = \tau / (1 - (1 - \tau) / \sqrt{1 + 1,61\lambda^2}), \quad (19)$$

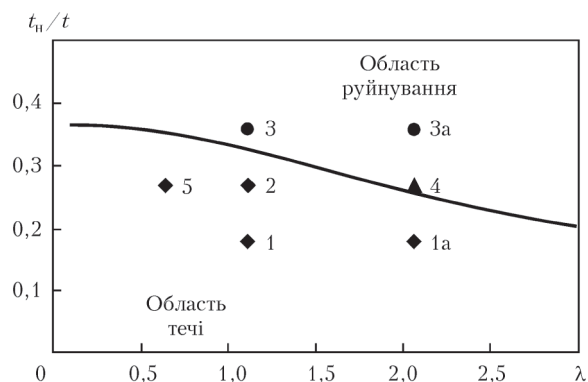


Рис. 5. Розрахункова умовна границя між «течею» та «руйнуванням»; значки з цифрами означають номер труби (табл. 1-6)

Таблиця 2. Зіставлення теоретичних розрахунків [4, 8] з експериментальними даними випробування внутрішнім тиском прямих труб з поздовжніми поверхневими надрізами

№ труби	P <sub>експ</sub> , МПа	Формула Інституту ім. Баттеля			Формула Інституту проблем міцності			Δ <sub>max</sub> , мм
		α <sub>Battelle</sub>	P <sub>Battelle</sub> , МПа	σ <sub>ref</sub> <sup>Battelle</sup> , МПа	α <sub>п</sub>	P <sub>ІПМ</sub> , МПа	σ <sub>ref</sub> <sup>ІПМ</sup> , МПа	
1	21,9	0,339	14,1	663,1	0,45	18,7	500,2	1,294
1a	11,7	0,252	10,5	477,9	0,281	11,7	427,9	0,732
2	23,0	0,464	19,3	509,9	0,528	22,0	447,7	1,359
4	15,8	0,361	15,0	449,5	0,368	15,3	441,3	1,008
5	29,8	0,619	25,7	495,2	0,724	30,1	423,0	2,162
3	23,1	0,567	23,6	419,5	0,605	25,2	392,4	1,415
3a	20,4	0,462	19,2	454,0	0,455	18,9	460,8	1,460

$$\begin{aligned} \alpha_{ІПМ} &= \alpha_{п}, \\ P_{Battelle} &= \alpha_{Battelle} \sigma_{в} t / R_1, \\ P_{ІПМ} &= \alpha_{ІПМ} \sigma_{в} t / R_1, \\ \sigma_{ref}^{Battelle} &= P_{експ} R_1 / (\alpha_{Battelle} t), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sigma_{ref}^{ІПМ} = P_{експ} R_1 / (\alpha_{ІПМ} t). \quad (21)$$

Запропоновані формули названо на честь інститутів, де їх розроблено: параметри з індексом «Battelle» — в Інституті ім. Баттеля (СІЛА), з індексом «ІПМ» — в Інституті проблем міцності НАН України. За границю міцності прийнято значення σ<sub>в</sub> = 427,5 МПа, отримане за результатами стандартних випробувань п'ятикратних циліндричних зразків на розтяг, вирізаних в поздовжньому (вздовж осі труби) та поперечному напрямках труби.

Незважаючи на те, що при розрахунку за формулами Інституту ім. Баттеля за граничну характеристику використано границю міцності замість середнього значення границь міцності та текучості, формули Інституту проблем міцності краще описують експеримент. За результатами випробувань умовну границю між «течією» та «руйнуванням» експериментально обґрунтовано (рис. 6).

Випробування внутрішнім тиском прямих труб з поперечними поверхневими надрізами. Об'єктами

Таблиця 3. Геометричні характеристики поперечних поверхневих надрізів труб для випробування внутрішнім тиском

№ труби	Глибина надрізу α, мм	Кут надрізу ψ, град
8	6,6	0...360
8a		0...360
9	5,0; 6,6	0...180; 180...360
9a		0...180; 180...360

Таблиця 4. Зіставлення теоретичних розрахунків [11] з експериментальними даними випробування внутрішнім тиском прямих труб з поперечними поверхневими надрізами

№ труби	Глибина надрізу α, мм	Кут надрізу ψ, град	P <sub>експ</sub> , МПа	«Глобальна» модель		«Локальна» модель	
				σ <sub>ref</sub> , МПа	P <sub>теор</sub> , МПа	σ <sub>ref</sub> , МПа	P <sub>теор</sub> , МПа
8	6,5	0...360	27,1	503,5	22,4	503,5	22,4
8a			24,3	451,5		451,5	
9	5,0; 6,6	0...180; 180...360	22,3	378,0	24,5	414,5	24,4
9a			25,8	437,3		479,5	

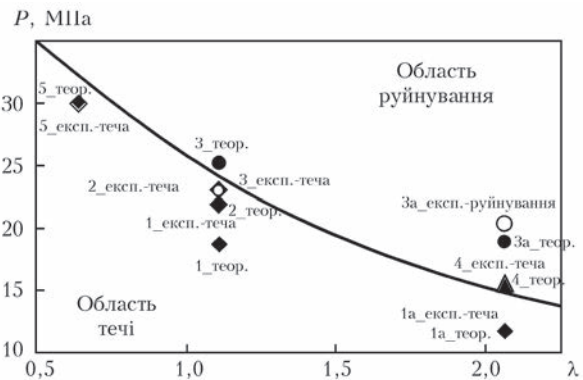


Рис. 6. Зіставлення теоретичних та експериментальних даних випробування обрано прямих труб (чотири зразки) діаметром 194×9, довжиною L = 800 мм, до обох торців яких приварено плоскі донця. Матеріал труб – Ст20. Поверхневі надрізи (табл. 3) наносились дисковою фрезою, розміри якої представлені в попередньому розділі.

Методика випробування аналогічна методиці, описаній раніше.

Результати зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними представлені в табл. 4. Розрахунок довідкових напружень σ<sub>ref</sub> проведений у відповідності з «локальною» та «глобальною» моделями [11]. Розрахунковий тиск граничного навантаження визначено як P<sub>теор</sub> = pσ<sub>в</sub>t / R<sub>сеп</sub>, де p = P<sub>сеп</sub> / (σ<sub>ref</sub>t) – безрозмірний внутрішній тиск, що за умови навантаження тільки внутрішнім тиском приймає аналогічний фізичний зміст коефіцієнту зменшення міцності α для труби з поздовжньою тріщиною; R<sub>сеп</sub> – середній радіус труби; σ<sub>в</sub> = 415,5 МПа – границя міцності матеріалу труб, прийнята за результатами стандартних випробувань на розтяг п'ятикратних ци-

**Таблиця 5. Геометричні характеристики поперечних поверхневих надрізів труб для випробування внутрішнім тиском і моментом згину**

№ труби	Глибина надрізу <i>a</i> , мм	Кут надрізу $\psi$ , град
1	12	0...360
2	13	0...180; 180...360
	11	0...180; 180...360

ліндричних зразків, вирізаних в поздовжньому та поперечному напрямках.

За результатами випробувань всі труби, як і прогнозувалось, втратили несучу здатність за механізмом «руйнування». Враховуючи, що навантаження відбувалось внутрішнім тиском, для отримання «течі» необхідно мати трубу з досить глибоким надрізом, що не дозволяє реалізувати складність технології його нанесення.

*Випробування внутрішнім тиском і моментом згину прямих труб з поперечними поверхневими надрізами.* За об'єкт випробування обрано прямі труби (два зразки) діаметром 160×16, довжиною  $L = 2000$  мм, до обох торців яких приварено плоскі донця. Матеріал труб – Ст22К. Поверхневі надрізи (табл. 5) наносились дисковою фрезою, розміри якої представлено в попередньому розділі.

Методика випробування аналогічна методиці, описаній раніше. Схема навантаження моментом згину труби представлена на рис. 7, де  $F$  – зосереджене зусилля;  $M_{зг}$  – момент згину;  $l_1 = 800$  мм;  $l_2 = 200$  мм — для труби № 1;  $l_1 = 9000$  мм;  $l_2 = 100$  мм — для труби № 2.

Результати зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними представлено в табл. 6. Розрахунок довідкових напружень  $\sigma_{ref}$  проведено як для «глобальної» моделі [11]. Для

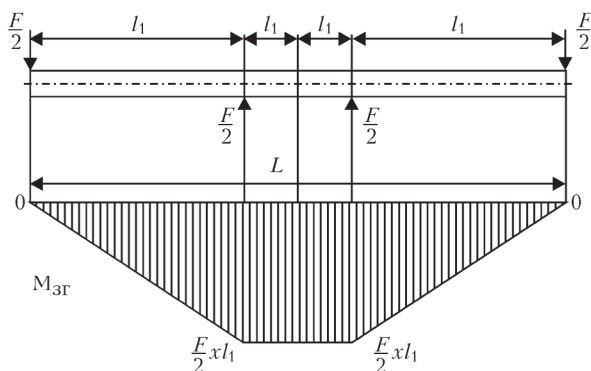


Рис. 7. Схема навантаження моментом згину труби діаметром 160×16 з поперечним поверхневим надрізом

**Таблиця 6. Зіставлення теоретичних розрахунків [11] з експериментальними даними випробування внутрішнім тиском та моментом згину прямих труб з поперечними поверхневими надрізами**

№ труби	Кут надрізу $\psi$ , град	Глибина надрізу <i>a</i> , мм		$P_{експ}$ , МПа	$M_{експ}$ , Нм	«Глобальна» модель
		Заявлена	Реальна			$\sigma_{ref}$ , МПа
1	0...360	12	13,0	10,0	$37,2 \cdot 10^3$	563,0
2	0...180	13	12,5	13,5	$43 \cdot 10^3$	539,9
	180...360	11	10,5			

встановлення реального значення границі міцності матеріалу трубного зразка № 1 в поздовжньому напрямку вирізано плоский зразок для проведення стандартного випробування на розтяг, за результатами якого отримано  $\sigma_b = 487,3$  МПа.

*Випробування внутрішнім тиском трубного відводу з поздовжнім поверхневим надрізом.* Об'єктом випробування слугував трубний відвід (один зразок) діаметром 219×12, розміри якого представлено на рис. 8. Матеріал відводу – сталь 08X18H10T. Поверхневий надріз довжиною 85 мм і глибиною 9 мм нанесений на зовнішню твірну відводу дисковою фрезою, розміри якої представлено в попередньому розділі.

Методика випробування аналогічна методиці, описаній раніше. Граничний стан трубного відводу з поздовжнім поверхневим надрізом визначається за таким же принципом, як і граничний стан прямої труби з відповідним надрізом:  $P_{теор} = \alpha_n \sigma_b t(YR_{ср}) = 39,2$  МПа, де  $\alpha_n = 0,486$  – коефіцієнт зменшення міцності дефектної прямої труби відповідно до виразу (19);  $\sigma_b = 626$  МПа – границя міцності матеріалу відводу, отримана за результатами стандартних випробувань п'ятиразових циліндричних зразків на розтяг. Функцію форми відводу  $Y$  визначено за допомогою формули

$$Y = (1 + 0,5\beta \sin\theta) / (1 + \beta \sin\theta) = 0,9, \quad (22)$$

де  $\beta = R_{ср} / B = 0,252$ ,  $B = 410,5$  мм – середній радіус кривизни відводу;  $\theta = \pi/2$  – кут відводу.

За результатами випробувань тиск руйнування склав  $P_{експ} = 38$  МПа або в термінах довідкових напружень  $\sigma_{ref} = 607$  МПа. Характер руйнування – «теча».

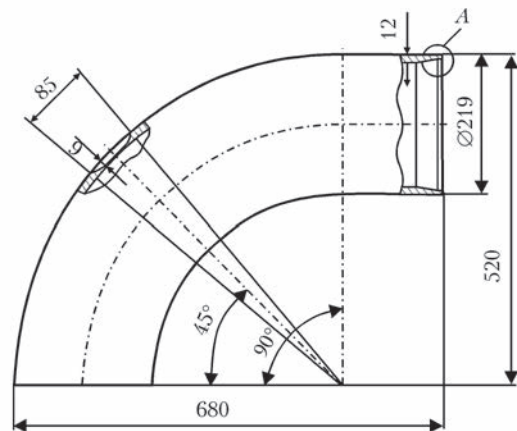


Рис. 8. Ескіз трубного відводу діаметром 219×12

Випробування внутрішнім тиском Т-подібного трійникового з'єднання з поздовжнім поверхневим надрізом основної труби. За об'єктом випробування обрано Т-подібні трійникові з'єднання (три зразка), розмірами основної труби діаметром 219×11, патрубкової труби діаметром 108×5. Матеріал з'єднання – сталь 08Х18Н10Т. Поверхневі надрізи глибиною  $a = 6$  мм і довжиною 40, 60, 80 мм наносились з одного боку від патрубкової труби пальчиковою фрезою діаметром 3 мм.

Методика випробування аналогічна методиці, описаній раніше.

Результати зіставлення теоретичних розрахунків [4, 6] з експериментальними даними представлені на рис. 9. Заміри реальних глибин надрізів, проведені після випробувань, показали, що глибина надрізів перших двох з'єднань (довжина надрізів 40 і 60 мм) складала 6,5 мм; глибина надрізу третього з'єднання (довжина надрізу 80 мм) – 5,5 мм. На рис. 10 дано зіставлення теоретичних розрахунків з результатами експерименту з урахуванням реальних глибин надрізів.

Основні ідеологічні особливості запропонованої методики визначення допустимої товщини елементів трубопроводів з вуглецевих сталей АЕС України такі:

- методика розроблена як доповнення норм на проектування [6] в частині оцінки дефектів, які можуть виникати внаслідок ЕКЗ металу під час тривалої експлуатації елементів трубопроводів атомних енергетичних установок і основана на сучасних підходах до оцінки дефектів. Вона відноситься до категорії нормативних документів ВЗП і є узгодженою з нормами на проектування [6]. Методика використовує єдині значення допустимих характеристик матеріалу і єдиною системою коефі-

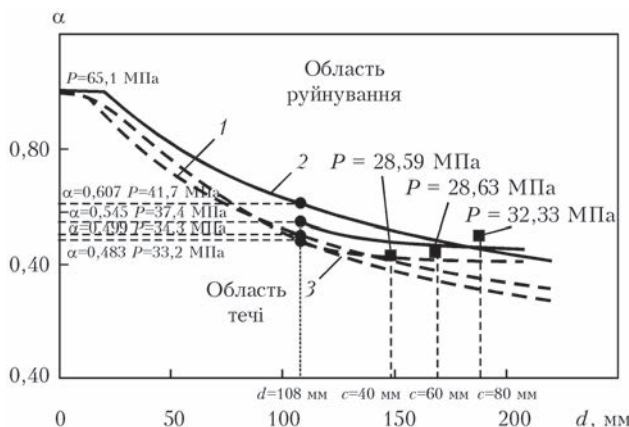


Рис. 9. Зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними випробування Т-подібних патрубкових з'єднань з поздовжнім надрізом основної труби: 1 – труба з непідкріпленим отвором [6]; 2 – труба з отвором, що підкріплений штуцером [6]; 3 – труба з непідкріпленим отвором [4]; 4 – труба з непідкріпленим отвором (симетричне рішення); 5 – труба з отвором, що підкріплений штуцером (симетричне рішення); ■ – експеримент

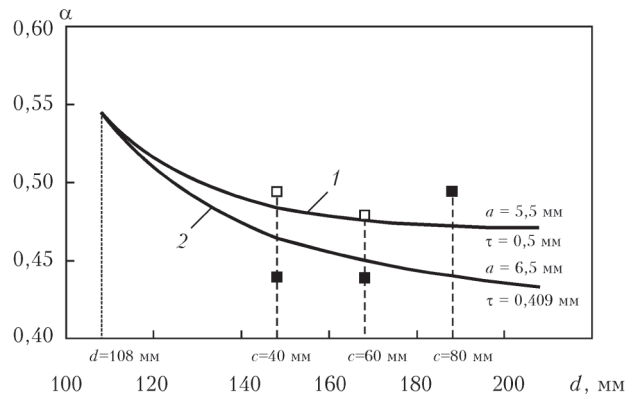


Рис. 10. Зіставлення теоретичних розрахунків з експериментальними даними випробування Т-подібних патрубкових з'єднань з поздовжнім надрізом основної труби з урахуванням реальної глибини надрізів: 1 – симетричне рішення (глибина 5,5 мм); 2 – симетричне рішення (глибина 6,5 мм); □ – несиметричне рішення (глибина 5,5 мм); ● – несиметричне рішення (глибина 6,5 мм); ■ – експеримент

цієнтів запасу міцності, однакові категорії напружень, режими експлуатації та критерії граничного стану матеріалу;

- методика дозволяє оцінювати тривимірні дефекти ЕКЗ, при цьому для визначення напруженого стану використовуються підходи граничного пластичного аналізу. Даний факт узгоджується з нормами [6], де, при визначенні допустимих напружень категорії  $(\sigma)_2$ , використовується коефіцієнт 1,3. Це значення можна отримати, якщо порівняти напруження від моменту згину  $M$  стосовно пружного  $\sigma_{\text{пружн}} = M / (\pi R_{\text{сеп}}^2 t)$  та розрахунку за теорією граничного пластичного стану  $\sigma_{\text{пласт}}^M = M / (4^2 t)$ . Разом з тим методика розглядає вузькі (тріщиноподібні) дефекти, оцінка яких здійснюється за двокритеріальним підходом механіки руйнування з урахуванням подвійної (крихкої та в'язкої) природи руйнування. Ключовим поняттям методики, як і зарубіжних документів ВЗП [4, 5], є коефіцієнт пластичного ослаблення  $\alpha$ , який представляє собою відношення міцності конструктивного елемента з дефектом до міцності бездефектного матеріалу;

- в методиці по аналогії з роботою [4] та іншими сучасними нормативними документами введено поняття допустимих напружень за наявності дефекту  $[\bar{\sigma}]$ , що в 1,1 рази перевищують допустимі напруження  $[\sigma]$  норм [6]. Це пояснюється тим, що при визначенні  $[\sigma]$  на стадії проектування існуючі коефіцієнти запасу неявно враховують існування дефекту;

- мінімально допустиму товщину стінки елементів трубопроводів з дефектом ЕКЗ визначають у відповідності з двома підходами: за консервативним (спрощеним) розрахунком аналогічно розрахунку на проектування норм [6] (без розрахунку НДС) та з розрахунком НДС відповідно до детального перевірного розрахунку норм [6]. Відповідно до консервативного розрахунку мето-

дикою не вимагається проведення розрахунку напружено-деформованого стану, оскільки вважається, що напружений стан відповідає гранично допустимому (тобто коли діючі напруження приймаються на рівні гранично допустимих значень), що є консервативним припущенням. Тоді допустиму товщину стінки визначають з умови  $\alpha = 0,9$ ;

- запропоновані методи та процедури оцінки граничного пластичного стану елементів трубопроводів з дефектами є рекомендованими. Разом з тим допускається використання інших розрахункових процедур, якщо вони за глибиною свого пророблення та більш точних фізичних моделей, повнішого врахування геометричних розмірів дефекту ЕКЗ, кількості параметрів, що враховуються, видів навантаження, властивостей матеріалів і достовірності не поступаються положенням запропонованої методики;

- методика передбачає проведення розрахунку залишкової довговічності, який полягає в прогнозуванні зміни розмірів дефекту в часі за відомими законами їх росту з перевіркою на кожному кроці виконання умови міцності.

### Висновки

1. Розроблено методи оцінки залишкової міцності товстостінної труби з поздовжнім поверхневим дефектом, що враховує його розташування (зовнішня або внутрішня поверхня) на залишкову міцність труби.

2. Розроблено методи оцінки залишкової міцності та універсальний чисельний алгоритм визначення довідкових напружень труби з поперечним поверхневим дефектом за умов комбінованого навантаження внутрішнім тиском, моментом згину та осьювою силою.

3. Розроблено методи оцінки залишкової міцності Т-подібного трійникового (патрубкового) з'єднання з поздовжнім поверхневим дефектом основної труби.

4. Проведено серію повномасштабних випробувань до руйнування елементів трубопроводів з поверхневими надрізами з метою обґрунтування коректності запропонованих методів та процедур.

5. Запропоновано узгоджену з нормами на проектування [6] методику визначення допустимої товщини елементів трубопроводів з вуглецевих сталей АЕС України, пошкоджених ЕКЗ.

### Список літератури

1. Тараненко В. И., Гашенко В. А., Бакиров М. Б. и др. (2001) Влияние химических элементов-примесей в углеродистой и кремнемарганцовистых сталях на ресурсные характеристики трубопроводов АЭС при эрозионно-коррозионном износе. *Теплоэнергетика*, **12**, 37–40.
2. Бараненко В. И., Янченко Ю. А. (2008) Эрозионно-коррозионный износ элементов трубопроводных систем АЭС. *Там же*, **5**, 27–35.
3. Тараненко В. И., Маркочев В. М., Олейник С. Г. и др. (2004) Учет эрозионно-коррозионного износа при эксплуатации трубопроводов АЭС. *Там же*, **8**, 34–38.

4. API RP 579. (2000) *Recommended practice for fitness for service*. American Petroleum Institute.
5. (1999) *Structural integrity assessment procedures for european industry: SINTAP*. Final Version, Nov., pp. 25–30.
6. ПНАЭ Г-7-002-86. (1989) *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Госатомэнергонadzор СССР. Москва, Энергоатомиздат.
7. Kiefner J. F., Maxey W. A., Eiber R. J., Duffy A. R. (1973) *Failyre stress levels of flaws in pressurized cylinders. Progress in flaw growth and fracture toughness testing*. ASTM STP 536, pp. 461–481.
8. Orynyak I. V. (2007) Leak and break models of pressurized pipe with axial defects. *Proc. of the biennial intern, pipeline conf.*, IPC 3 PART A, 41–56.
9. Kanninen M. F., Zahoor A., Wilkowski G. et al. (1982) *Instability predictions for circumferentially cracked type-304 stainless steel pipes under dynamic loading*. EPRI NP-2347, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
10. Орынйак И. В., Агеев С. М. (2009) Моделирование предельного пластического состояния толстостенных труб с осевыми поверхностными дефектами. *Пробл. машиностроения и надежности машин*, **4**, 115–123.
11. Орынйак И. В., Агеев С. М. (2010) *Розрахунок  $\sigma_{ref}$  для поперечних дефектів складної форми в трубах*. *Машинознавство*, **7**, 3–11.

### References

1. Taranenko, V.I., Gashenko, V.A., Bakirov, M.B. et al. (2001) Influence of chemical elements-impurities in carbon- and silicon-manganese steels on service life characteristics of NPP pipings in erosion-corrosion wear. *Teploenergetika*, **12**, 37-40 [in Russian].
2. Baranenko, V.I., Yanchenko, Yu.A. (2008) Erosion-corrosion wear of elements of piping systems of NPP. *Ibid.*, **5**, 27-35 [in Russian].
3. Taranenko, V.I., Markochev, V.M., Olejnik, S.G. et al. (2004) Accounting of erosion-corrosion wear in operation of NPP piping. *Ibid.*, **8**, 34-38 [in Russian].
4. API RP 579. (2000) *Recommended practice for fitness for service*. American Petroleum Institute.
5. (1999) *Structural integrity assessment procedures for European industry: SINTAP*. Final Version, 25-30.
6. PNAE G-7-002-86. (1989) *Strength standards of equipment and piping of nuclear power plants*. Gosatomenergondzorz SSSR. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
7. Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J., Duffy, A.R. (1973) *Failyre stress levels of flaws in pressurized cylinders. Progress in flaw growth and fracture toughness testing*. ASTM STP 536, 461-481.
8. Orynyak, I.V. (2007) Leak and break models of pressurized pipe with axial defects. In: *Proc. of the Biennial Intern. Pipeline Conf.*, IPC 3 PART A, pp. 41-56.
9. Kanninen, M.F., Zahoor, A., Wilkowski, G. et al. (1982) *Instability predictions for circumferentially cracked type-304 stainless steel pipes under dynamic loading*. EPRI NP-2347, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
10. Orynyak, I.V., Ageev, S.M. (2009) Simulation of limiting state of thick-wall pipes with axial surface defects. *Problemy Mashinost. i Nadyozhnosti Mashin*, **4**, 115-123.
11. Orynyak, I.V., Ageev, S.M. (2010) *Calculation of  $\sigma_{ref}$  for transverse defects of complex shape in pipes*. *Mashynoznavstvo*, **7**, 3-11.

И. В. ОРИНЯК, А. Я. КРАСОВСКИЙ, М. В. БОРОДИЙ,  
С. М. АГЕЕВ

Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины.  
01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2.  
E-mail: info@ipp.kiev.ua

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДОПУСТИМОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ  
ТРУБОПРОВОДОВ АЭС ПРИ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОН-

НОМ ИЗНОСЕ МАТЕРИАЛА

Разработаны методы оценки остаточной прочности элементов трубопроводов (прямых труб и Т-образных тройниковых соединений) с дефектами, опирающиеся на статическую теорему предельной нагрузки теории пластичности. С целью проверки предложенных методов проведена серия полномасштабных испытаний до разрушения элементов трубопроводов с поверхностными надрезами. Предложено согласованную с нормами на проектирование методику определения допустимой толщины элементов трубопроводов из углеродистых сталей АЭС Украины, поврежденных эрозионно-коррозионным износом. Библиогр. 11, табл. 3, рис. 10.

Ключевые слова: трубопровод; дефект; эрозионно-коррозионный износ; предельная нагрузка вязкого разрушения

DEVELOPMENT OF PROCEDURE FOR DETERMINATION OF WALL THICKNESS IN NPP PIPELINE AT EROSION-CORROSION WEAR OF MATERIAL\*

I. V. ORYNYAK, A. Ya. KRASOVSKIY, V. M. BORODIY, S. M. AGEEV

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, 2 Timiryazevska str., Kyiv-14, 01014. E-mail: info@ipp.kiev.ua

Developed are the methods for assessment of residual strength of pipeline elements (straight pipe and T-shaped tee joints) with flaws that are based on a static law of boundary loading in plasticity theory. In order to verify the correctness of proposed methods a series of full-scale tests were carried out up to failure of pipeline elements with surface cuts. The procedure agreed with the design norms was proposed to Ukrainian NPP for determination of allowable thickness of pipeline elements from carbon steels that were damaged by erosion-corrosion wear. 11 Ref., 3 Tabl., 10 Fig.

Keywords: pipeline; flaw; erosion-corrosion wear, boundary loading of ductile fracture

Надійшла до редакції  
15.11.2017

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ  
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



**Міжнародна конференція  
«ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ –  
СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ»**

Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.  
Україна, м. Київ

Голова:  
академік НАН України Л. Лобанов

**НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ**

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.02.2018 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03150  
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com



# ОБНАРУЖЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ПОВТОРНОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ СтЗсп

В. Л. АЛЕКСЕНКО<sup>1</sup>, А. А. ШАРКО<sup>2</sup>, С. А. СМЕТАНКИН<sup>1</sup>, Д. М. СТЕПАНЧИКОВ<sup>2</sup>, К. Ю. ЮРЕНИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Херсонская гос. морская акад. 73000, г. Херсон, пр-т Ушакова, 20, г. E-mail:ksma@ksma.ks.ua

<sup>2</sup>Херсонский нац. техн. ун-т. 73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24. E-mail:kntu@kntu.net.ua

Установлено наличие трех участков последовательно уменьшающейся интенсивности акустической эмиссии при повторном одноосном нагружении, соответствующих зонам деформационного упрочнения стали СтЗсп. Обнаружен эффект уменьшения плотности сигналов акустической эмиссии при возрастании нагрузки. Дается объяснение этому явлению, исходя из представления энергии излучаемых сигналов. Библиогр. 9, табл. 3, рис. 7.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, эффекты, сталь, нагружение, сигналы, информация, дислокации

Повышение надежности оборудования – одна из многоплановых задач технического диагностирования, позволяющего определять состояние оборудования непосредственно в процессе эксплуатации, а также прогнозировать его изменения. Среди методов технической диагностики особое место принадлежит неразрушающему контролю технического состояния объектов по измерениям физико-механических свойств материалов без разборки элементов конструкции. Для осуществления такого контроля необходимо изучить корреляционные связи между механическими характеристиками металлов и параметрами акустической эмиссии (АЭ) в различных условиях испытания материалов.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме показывает, что связь между процессом образования дефектов и наличием сигналов АЭ позволяет определять степень работоспособности материала при изменяющихся условиях эксплуатации изделий [1, 2], уровень напряжений и деформации материала [3], обнаруживать дефекты [4], определять их координаты, оценивать степень их опасности [5]. Проблемные вопросы изучения явления АЭ освещены в работах [6–8], однако в них не акцентируется внимание на причинах и механизмах зарождения источников АЭ.

Целью данной работы является исследование взаимосвязи структурных переходов в объеме деформируемого материала с параметрами сигналов АЭ.

В основе постановки настоящей работы лежит реализация эффекта Кайзера, заключающегося в отсутствии или существенном уменьшении АЭ при повторном нагружении образцов вплоть до того момента, когда нагрузка при последующем нагружении не достигнет максимального значения, зафиксированного в предыдущем цикле.

Для эксперимента была выбрана одна из распространенных конструкционных углеродистых

сталей СтЗсп. Образцы для испытаний на одноосное растяжение размером 223×37×3 мм вырезали из листового проката и выбирали из условий размещения на недеформируемых участках образцов АЭ датчиков.

Идентификация структурных особенностей накопления повреждений материалов по данным АЭ осуществлялась на основе анализа степени деформации образцов, полученной из испытаний на разрывной машине УМ5. В качестве контактного материала между преобразователями АЭ и образцом использовалось трансформаторное масло. В измерительной установке использовались широкополосные датчики к акустико-эмиссионному прибору АФ15.

Используемая в эксперименте информационно-измерительная система обеспечивала индикацию, регистрацию и предобработку сигналов АЭ с дальнейшим ее сохранением в памяти персонального компьютера для последующей постобработки полученных данных и их визуализации в реальном масштабе времени с помощью запоминающего осциллографа (RIGOL DS1052E Digital oscilloscope).

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Измерение деформации образцов проводилось путем фиксации удлинения с помощью микрометрического электронного индикатора перемещения Micron digital indicator DT-7011.

В основе его работы используется емкостная матрица-кодер в виде двух последовательно соединенных конденсаторов, образующих цифровой нониус. Прибор одним концом через струбцину крепился к верхнему захвату разрывной машины, касаясь индикаторной стойки. Другой конец индикаторной стойки через струбцину крепился к нижнему захвату разрывной машины.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

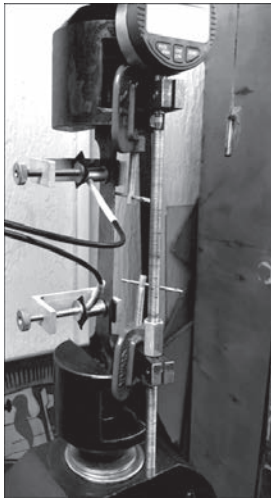


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

В отличие от одноосного первичного нагружения, характеризуемого дискретным возникновением актов АЭ, при повторном нагружении обнаруживается непрерывный характер акустической эмиссии.

При более детальном рассмотрении временных распределений амплитуд сигналов АЭ при возрастающих нагрузках можно заметить, что они объединяются в группы или участки, критериями принадлежности к которым являются изменения их плотности. По результатам акустических измерений установлено наличие трех участков с последовательно уменьшающейся плотностью АЭ сигнала (табл. 1).

Динамику физических процессов, сопровождающих излучение АЭ отражает амплитудно-временное распределение АЭ  $n(A,t)$ , т. е. функция, указывающая количество импульсов АЭ  $dN$ , за

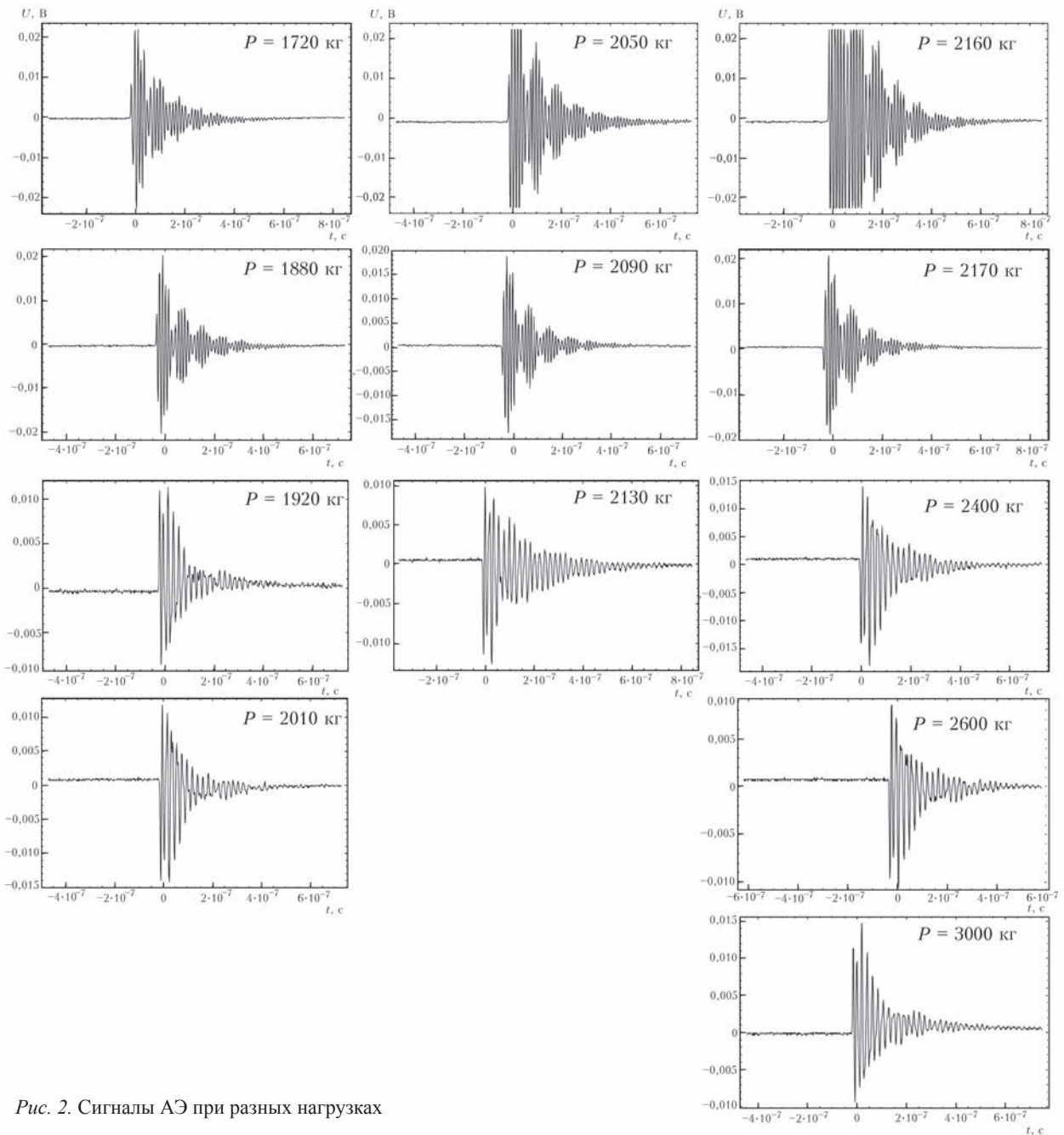


Рис. 2. Сигналы АЭ при разных нагрузках

Таблица 1. Участки уменьшения плотности АЭ сигналов при повышении нагрузки

Зоны уменьшения плотности АЭ сигнала при повышении нагрузки	Нагрузка $P$ , кг				
	1720	1880	1920	2010	—
1 участок	1720	1880	1920	2010	—
2 участок	2050	2090	2130	—	—
3 участок	2160	2170	2400	2600	3000

регистрируемых в промежутке времени от  $t$  до  $t + dt$ , амплитуда которой заключена в интервале от  $A$  до  $A + dA$ :

$$dN = n(A,t)dAdt.$$

Если полное время регистрации АЭ находится в интервале от 0 до  $T$ , то:

$$n(A) = \int_0^T n(A,t)dt \text{ и } N = \iint_0^T n(A,t)dt dA.$$

Согласно принципу неопределенности чем больше функция сконцентрирована во времени, тем больше она размыта в частотной области. При изменении масштаба функции произведение плотности вероятности временных и частотных диапазонов остается постоянным [8].

Эффективным способом анализа непрерывных сигналов АЭ являются преобразования Фурье, в которых сигнал раскладывается на базис синусов и косинусов разных частот. Коэффициенты преобразования находятся путем вычисления скалярного произведения сигнала с комплексными экспонентами:

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\Omega t} dt,$$

где  $f(t)$  – сигнал;  $F(\Omega)$  – преобразование Фурье.

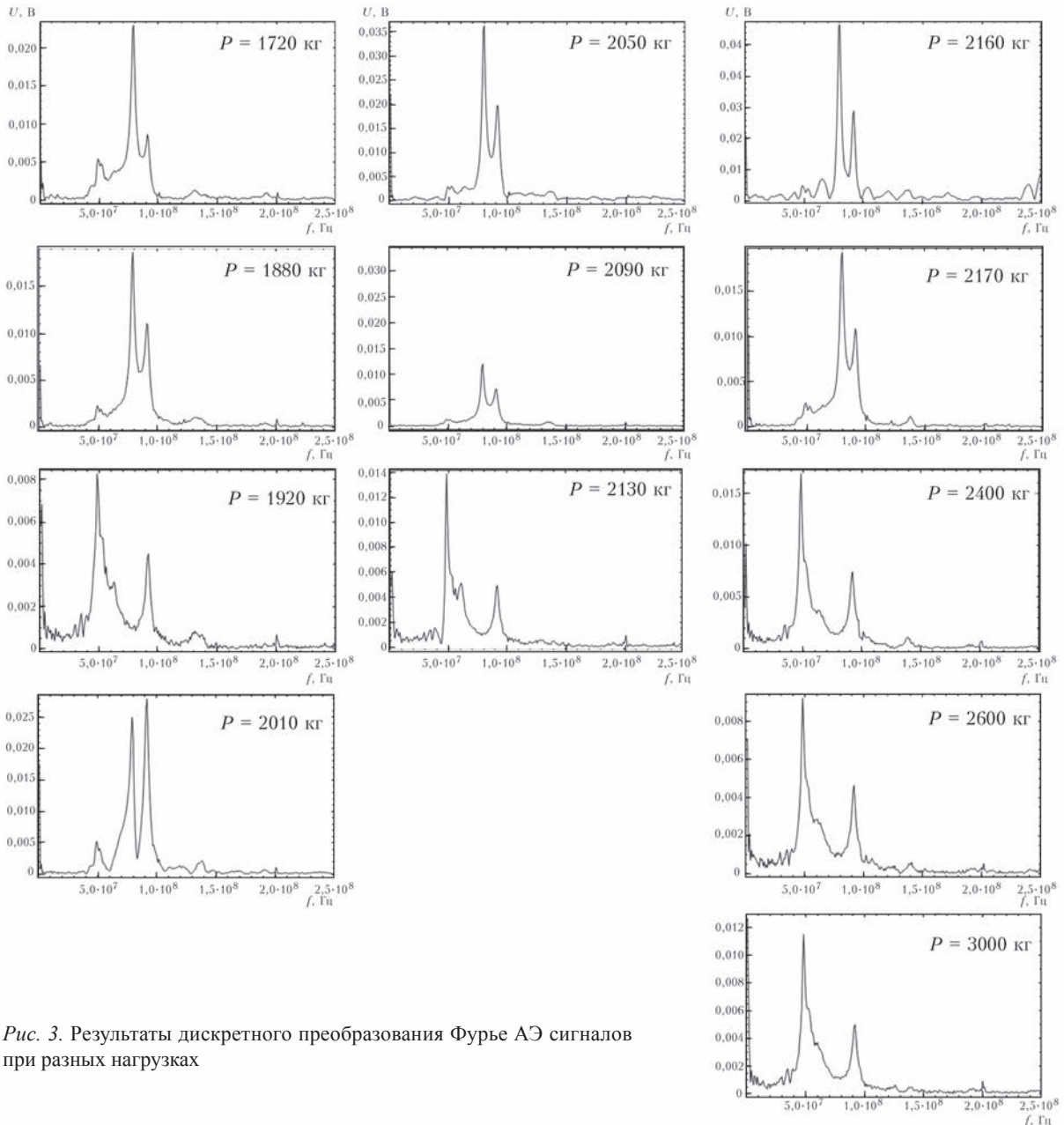


Рис. 3. Результаты дискретного преобразования Фурье АЭ сигналов при разных нагрузках

Вместе с тем анализ сигналов АЭ с помощью преобразования Фурье имеет ряд недостатков, связанных с тем, что отдельные особенности сигналов вызывают незначительные изменения частотного образа и сглаживаются по всей частотной оси.

Частично проблема спектрального анализа и синтеза сигналов АЭ может быть решена с помощью оконного преобразования Фурье:

$$F(\Omega, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\omega(t-b)e^{-j\Omega t} dt$$

При этом используется операция умножения сигнала на окно  $(t-b)$ , которая представляет собой локальную функцию, перемещающуюся вдоль временной оси. Тогда преобразование становится зависимым от времени и получаем частотно-временное описание сигнала. Результаты такого преобразования Фурье представлены на рис. 3.

Анализ частотной зависимости АЭ сигнала позволил оценить смещение характерных пиков АЭ сигналов в зависимости от приложенной нагрузки.

Информативным параметром АЭ является общее число импульсов, или суммарный счет актов АЭ (total emission)  $N(\text{имп})$ , определяемый как число превышений импульсов АЭ над уровнем дискриминации за время наблюдения.

При обработке экспериментальных данных использовалась система компьютерной математики Mathematica 9.0 и алгоритмы работы с массивами числовых данных: нахождение максимальных (минимальных) элементов массива, сортировка данных массива по признаку, объединение данных, сплайновая интерполяция.

Распределение амплитуд акустических сигналов при увеличении приложенной нагрузки представлено на рис. 4.

Обработка сигналов АЭ от двух датчиков позволила оценить уровень дискриминации, выше которого фиксируется характер распределения амплитуд АЭ при увеличении приложенной нагрузки, который для первого датчика АЭ составил

0,01 В, для второго – 0,08 В. Последующее вычисление количества превышений точек  $N$  над уровнями дискриминации представлено на рис. 5.

В результатах измерений от обоих датчиков прослеживается общий характер изменения АЭ импульсов, что свидетельствует об идентичности используемых акустических датчиков для исследования акустико-эмиссионных эффектов стали СтЗсп.

Динамической характеристикой АЭ является скорость счета или интенсивность АЭ, определяемая делением общего числа импульсов  $N$  на наблюдаемый интервал времени, который для осциллографа RIGOL DS1052E Digital oscilloscope, являющегося частью АЭ системы, составлял 2 мкс.

Результаты определения этой величины для обоих датчиков представлены на рис. 6.

Максимальная скорость счета АЭ импульсов наблюдается вблизи нагрузки 2160 кг, что соответствует деформации образца 1,6 % для обоих датчиков и переходу к участку деформационного упрочнения для данной марки стали. Разница в численных значениях амплитуд обоих датчиков служит основанием для приоритетного использования информации, снятой с первого датчика.

Поскольку фиксируемое усилие на диаграмме растяжения относится непосредственно к измеряемому образцу, то для придания общности результатов исследуемому материалу, следует выражать его через значение механических напряжений, полученных делением прилагаемых усилий на площадь сечения образца.

Совмещенные кривые зависимостей напряжений и скорости счета АЭ от деформации приведены на рис. 7, где вертикальные пунктирные линии показывают границы зон уменьшения плотности АЭ сигнала при повышении нагрузки.

Как следует из рис. 7, при повторном нагружении образцов максимум скорости счета АЭ приходится на участок диаграммы нагружения, соответствующий завершению площадки текучести,

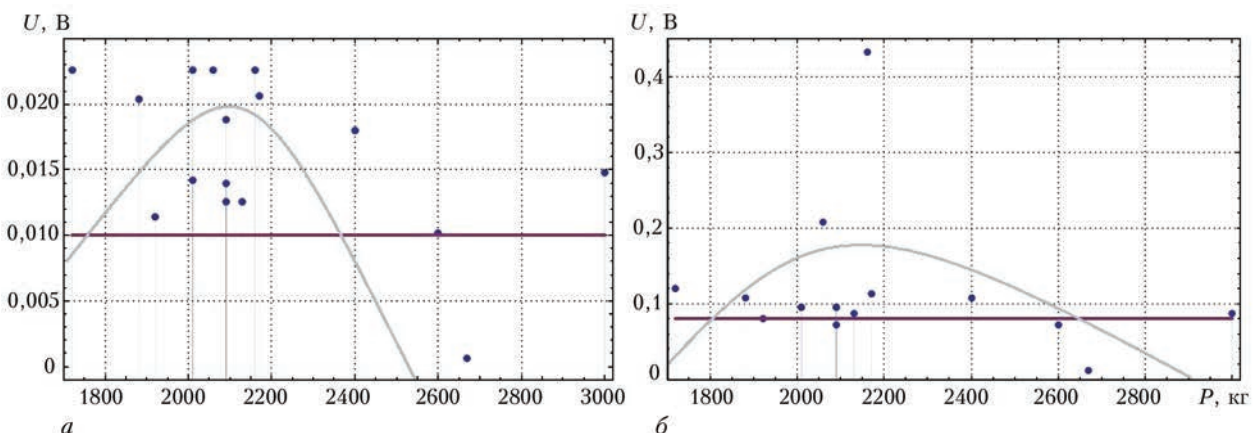


Рис. 4. Распределение амплитуд акустических сигналов при увеличении приложенной нагрузки: а – первый датчик ( $U = 0,01$  В); б – второй датчик ( $U = 0,08$  В)

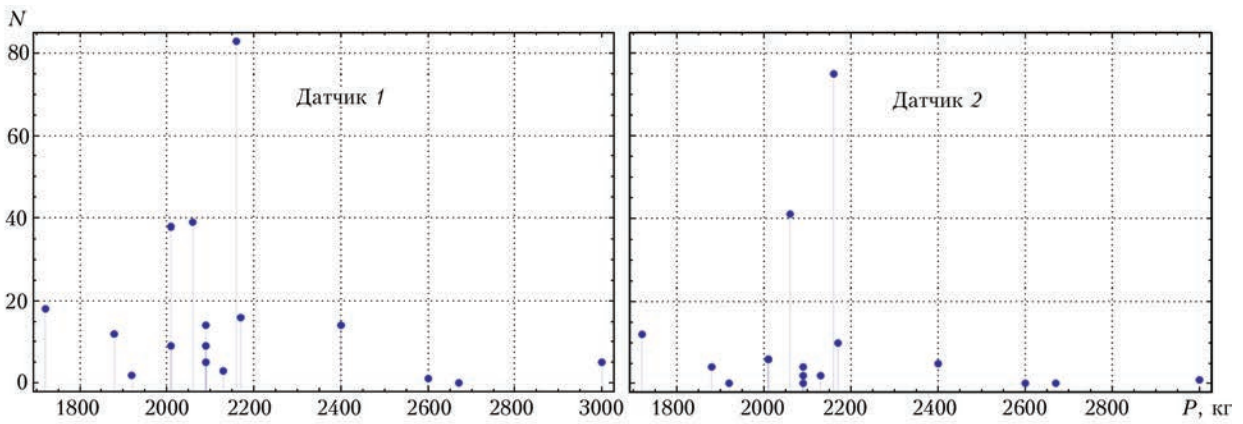


Рис. 5. Общее количество превышений амплитуд АЭ над уровнями дискриминации

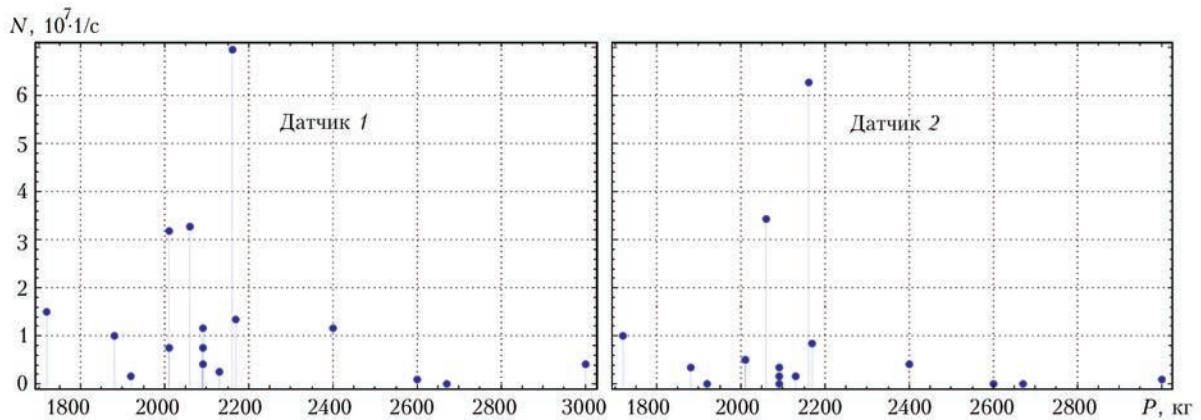


Рис. 6. Интенсивность сигналов акустической эмиссии при разных нагрузках

причем отмеченная закономерность характерна для информации, полученной от обоих датчиков.

Экспериментальные значения основных характеристик АЭ сигналов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп представлены в табл. 2.

Плотность распределения сигналов АЭ определялась путем вычисления отношения количества пересечений нулевого уровня формы АЭ сигнала ко времени его существования.

Возможный механизм возникновения сигнала АЭ твердых тел выглядит следующим образом. Для возникновения эффекта АЭ необходимо высвобождение энергии. Прорыв скоплений дислокаций освобождает упругую энергию их взаимодействия и вызывает излучение упругих волн. Источниками АЭ при деформации материалов являются процессы аннигиляции дислокаций при их выходе на свободную поверхность образца. При одновременном движении дислокаций, вызванных повторным нагружением образца, волны напряжений, накладываясь друг на друга, создают непрерывную акустическую эмиссию.

При использовании явления АЭ для неразрушающего контроля необходимо установить набор параметров АЭ, несущих

информацию о различных сторонах контролируемого процесса и выбрать из них наиболее оптимальные. Результаты исследования представлены в табл.3.

Исследования АЭ при нагружении материалов, могут быть полезными при изучении свойств полимерных композитных материалов. В них скорость распространения ультразвуковых колебаний зависит не только от плотности и упругих свойств, но и от вязкости, и степени структурной неоднородности материалов. Эти особенности являются причиной дисперсии, интерференции и рассеяния акустических волн в результате их отражения и преломления

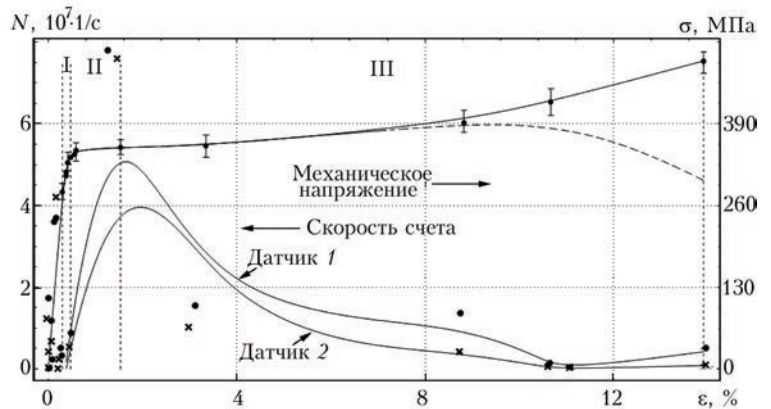


Рис. 7. Зависимости напряжений и интенсивности АЭ от деформации образца

Таблица 2. Экспериментальные значения основных характеристик АЭ сигналов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп

Участки деформационного упрочнения	Нагрузка $P$ , кг	Характеристики АЭ эффектов				Механическое напряжение $\sigma$ , МПа
		Пиковые амплитуды $U$ , В	Плотность сигналов $N'$ , $10^7$ 1/с	Общее число импульсов $N$ , имп	Интенсивность сигнала $N$ , $10^7$ имп/с	
I	1720	0,0226	4,69	18	1,507	281,1
	1880	0,0204	4,02	12	1,005	307,3
	1920	0,0114	1,93	2	0,167	313,8
	2010	0,0142	1,59	9	0,753	328,5
II	2050	0,0226	5,53	39	3,266	335,1
	2090	0,0126	4,10	5	0,418	341,6
	2130	0,0126	3,27	3	0,251	348,1
III	2160	0,0226	6,53	83	6,951	353,0
	2170	0,0206	4,44	16	1,340	354,7
	2400	0,0180	2,93	14	1,172	392,3
	2600	0,0102	2,51	5	0,418	424,9
	3000	0,0148	2,17	1	0,083	490,3

Таблица 3. Информационные параметры АЭ сигналов, рекомендуемые к использованию при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп

Параметры АЭ сигнала	Критерии	Операции	Характер проявления	Пригодность
Пиковая амплитуда	Абсолютная величина	Сравнение с предшественником	Стохастические изменения	–
Амплитудно-временное распределение	Плотность распределения амплитуд во времени	Группировка по участкам роста плотности амплитуд	Наращение плотности амплитуд внутри групп	+ – качественный характер
Амплитудно-частотное распределение	Частотный диапазон	Преобразование Фурье	Смещение характерных пиков	+ – нет зависимости от времени
Общее число импульсов $N$ (имп)	Суммарный результат	Анализ отклонений	Превышение над уровнем дискриминации	+
Интенсивность (скорость счета) $N$ (имп/сек)	Динамические оценки	Учет временных интервалов	Различные скорости изменений	+

на границах неоднородностей, которые стимулированы не только механическими нагрузками, но и такими воздействиями, как микроволновое ультразвуковое излучение, магнитная обработка [9].

Проведенные исследования могут служить модельным представлением изменения свойств и прогнозирования остаточного ресурса реальных промышленных конструкций, подвергающихся воздействию сложных нагрузок.

**Выводы**

1. Обнаружен и количественно подтвержден эффект существенного уменьшения плотности распределения сигналов АЭ при возрастании нагрузки на разных стадиях деформационного упрочнения материалов.

2. Установлено наличие трех участков деформационного упрочнения, регистрируемых с помощью метода АЭ: первый участок при нагрузках 1720, 1780, 1920 и 2010 кг, соответствующих участку упругой деформации, второй при нагрузках, соответствующих области текучести – 2050, 2090, 2130 кг; третий при нагрузках, соответству-

ющих деформационному упрочнению – 2160, 2170, 2400, 2600 и 3000 кг. В зоне перехода от одного участка деформационного упрочнения к другому наблюдается четкое изменение характера АЭ.

3. Наблюдаемые закономерности изменения сигналов АЭ при переходе от одного участка деформационного упрочнения к другому, отражают различный вклад процессов деформации разрушения в формирование источников АЭ.

4. Использование инструментария АЭ дает возможность найти неизвестные ранее характеристики структуры материалов, проследить динамику их развития, устойчивость, целостность и обеспечить прогнозирование развития дефектов материала.

**Список литературы**

1. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарева У. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 9–13.
2. Скальський В. Р., Лясота І. М., Станкевич О. М. (2012) Акустико-емісійне діагностування втомного руйнування алюмінієвого сплаву 1201-Т. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 48, 5, 110–116.

3. Назарчук З. Т. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Науково-технічний посібник.* Київ, Наукова думка.
4. Pollok A. (1989) Acoustic Emission Inspection. *Metals Handbook. Ninth Edition ASM International*, **17**, 278–294.
5. Болотин Ю. И., Дробот Ю. Б. (2003) *Акустическая эмиссия хрупких микроразрушений.* Москва, Машиностроение.
6. Lymarenko Y. A., Shamprovs kij A. D. (2003) Mathematical modeling of acoustic emission process. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 30–33.
7. Папилов И. И., Стоев П. И. (2014) Обнаружение и исследование акустоэмиссионных эффектов при пластической деформации сталей в магнитном поле. *Доповіди Національної академії наук України*, **1**, сс. 81–89.
8. Marasanov V., Sharko A. (2016) Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals. *International Frontier Science Letters. Switzerland*, **10**, 37–44.
9. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Бадишук В. І. (2004) Дослідження впливу ультрафіолетового випромінювання та магнітної природи наповнювачів на властивості епоксинаповнених матеріалів. *Вопросы химии и химической технологии*, **3**, 101–104.

References

1. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I., Kushnareva, U.S. (2016) On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 9-13 [in Russian].
2. Skalsky, V.R., Lyasota, I.M., Stankevich, O.M. (2012) Acoustic emission diagnostics of fatigue fracture of aluminium alloy 1201-T. *Fiz.-Khimich. Mechanika Materialiv*, **48(5)**, 110-116 [in Ukrainian].
3. Nazarchuk, Z.T. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structure elements: Sci.-Techn. Handbook.* Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Pollok, A. (1989) Acoustic emission inspection. *Metals Handbook. 9th Ed. ASM International*, **17**, 278-294.
5. Bolotin, Yu.I., Drobot, Yu.B. (2003) *Acoustic emission of brittle microfractures: Monography.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Lymarenko, Y.A., Shamprovs kij, A.D. (2003) Mathematical modeling of acoustic emission process. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, **1**, 30-33.
7. Papirov, I.I., Stoev, P.I. (2014) Detection and investigation of acoustic emission effects under plastic deformation of steels in magnetic field. *Dopovidi NANU*, **1**, 81-89 [in Russian].
8. Marasanov, V., Sharko, A. (2016) Mathematical models for interrelation of characteristics of the developing defects with parameters of acoustic emission signals. *Int. Fronter Sci. Letters. Switzerland*, **10**, 37-44.
9. Buketov, A.V., Stukhlyak, P.D., Badishchuk, V.I. (2004) Study of influence of ultraviolet radiation and magnetic

nature of fillers on properties of epoxy filled materials. *Voprosy Khimii i Khimich. Tekhnologii*, **3**, 101-104.

V. Л. АЛЕКСЕНКО<sup>1</sup>, А. О. ШАРКО<sup>2</sup>, С. А. СМЕТАНКІН<sup>1</sup>,  
Д. М. СТЕПАНЧИКОВ<sup>2</sup>, К. Ю. ЮРЕНІН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Херсонська держ. морська акад. 73000, м. Херсон,  
пр-т Ушакова, 20, м E-mail:

<sup>2</sup>Херсонський нац. техн. ун-т. 73008, м. Херсон,  
Бериславське шосе, 24. E-mail:

ВИЯВЛЕННЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИХ ЕФЕКТІВ ПРИ  
ПОВТОРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ЗРАЗКІВ  
ІЗ СТАЛІ Ст3сп

Встановлено наявність трьох ділянок, де послідовно зменшується інтенсивність акустичної емісії при повторному одноосовому навантаженні, які відповідають зонам деформаційного зміцнення сталі Ст3сп. Виявлено ефект зменшення щільності сигналів акустичної емісії при зростанні навантаження. Дається пояснення цьому явищу, виходячи з уявлення енергії сигналів, що випромінюються. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: акустична емісія, ефекти, сталь, навантаження, сигнали, інформація, дислокації

DETECTION OF ACOUSTIC-EMISSION EFFECTS DURING  
RELOADING OF St3sp STEEL SPECIMENS

V. L. ALEKSEENKO<sup>1</sup>, A. A. SHARKO<sup>2</sup>, S. A. SMETANKIN<sup>1</sup>,  
D. M. STEPANCHIKOV<sup>2</sup>, K. Yu. YURENIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kherson State Marine Academy, 20 Ushakov ave., Kherson,  
73000, E-mail:ksma@ksma.ks.ua

<sup>2</sup> Kherson National Technical University, 24 Berislavskoe shosse  
str., Kherson, 73008. E-mail:kntu@kntu.net.ua

Presence of three zones with successively reducing intensity of acoustic emission at repeated single-axis loading was determined, which correspond to the strain hardening zones of St3sp (killed) steel. An effect of decrease of acoustic emission signal density at loading rise was found. An explanation of this effect is given following from the presentation of energy of signals being emitted. 9 Ref., 3 Tabl., 7 Fi

Keywords: acoustic emission, effects, steel, loading, signals, information, dislocations

Поступила в редакцію  
31.10.2017

НОВЫЕ ИЗДАНИЯ

В. В. Кныш, С. А. Соловей. **Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями.** – Киев, КПИ им. Игоря Сикорского, 2017. – 315 с. Твердый переплет, 150×225 мм.

Монография посвящена проблеме продления срока службы элементов сварных металлоконструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, на разных стадиях их поврежденности: от накопления усталостных повреждений до развития магистральных трещин. Исследовано влияние высокочастотной механической проковки на повышение циклической долговечности сварных соединений как на стадии изготовления, так и после длительной эксплуатации. Предложены подходы к расчетному определению кинетики усталостных трещин в полях остаточных напряжений растяжения и сжатия. Рассмотрены конструктивные и технологические способы торможения усталостных трещин.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями в области усталости элементов сварных металлоконструкций длительной эксплуатации, расчетными методами определения и продления их ресурса. Может быть полезна студентам и аспирантам высших учебных заведений технических специальностей.



## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ МАГНИТОПОРОШКОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

В. А. ТРОИЦКИЙ, В. М. ГОРБИК, О. С. БОРОДАЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены типовые конструкции существующих намагничивающих устройств на постоянных магнитах, которые используются при магнитопорошковом методе контроля. Отмечены недостатки намагничивающих устройств с гибким соединением полюсов стальным тросом и показаны преимущества устройств, в которых это соединение выполнено гибким шарнирным магнитопроводом (ярмом). Представлены результаты изучения распределения магнитных потоков в системах с тросом и межполюсным ярмом. Также приведены технические характеристики серийно выпускаемых намагничивающих устройств. Представлены результаты анализа эффективности обнаружения дефектов намагничивающими устройствами с шарнирным магнитопроводом. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 13.

*Ключевые слова:* магнитопорошковый контроль; намагничивающее устройство; постоянный магнит; магнитный поток; магнитное поле; магнитная индукция

Магнитопорошковый контроль (МПК) является одним из основных методов оценки качества металлоконструкций, обнаружения в них поверхностных и подповерхностных нарушений, трещин различного происхождения, непроваров сварных соединений, надрывов и других несплошностей.

Для намагничивания изделий при МПК наряду с использованием магнитных полей, создаваемых электрическими токами, во всем мире широко применяются намагничивающие устройства (НУ) с постоянными магнитами с гибким соединением полюсов стальным ферромагнитным тросом. Такие НУ разрабатывались и в ИЭС им. Е. О. Патона 20...25 лет тому назад. Они до сих пор выпускаются под названием МАГЭКсы. Такие конструкции просты в изготовлении, позволяют магнитным полюсам занимать любые пространственные положения на поверхностях различных объектов, что определило их широкое использование и способствовало распространению МПК на основе постоянных магнитов. Магнитопорошковый контроль на постоянных магнитах имеет много технологических преимуществ, описанных в книге [1], в сравнении с другими вариантами МПК.

Практика показала, что более перспективными являются НУ с постоянными магнитами, соединение полюсов в которых выполнено не тросом, а гибким шарнирным магнитопроводом (ярмом), ферромагнитная часть поперечного сечения которого на порядок больше, чем у троса. При этом важно, чтобы конструкция НУ обеспечивала намагничивание и располагалась параллельно плоскости контролируемого объекта. Покажем, что

выполнение этих двух требований существенно повышает эффективность НУ.

Типовые конструкции двух упомянутых выше НУ приведены на рис. 1, а их технические характеристики – в таблице. Это серийно выпускаемые НУ, которое широко используются во всех отраслях промышленности.

В таблице жирным шрифтом выделено несколько принципиальных различий, подчеркивающих важность замены троса (рис. 1, а) на шарнирное гибкое ярмо (рис. 1, д) и уменьшение вертикально направленных магнитных потоков рассеяния путем намагничивания параллельно поверхности контролируемого объекта. Из таблицы видно, что при приблизительно равных величинах тангенциальных составляющих (8 и 11,2 кА/м) магнитная индукция на полюсах при тросе должна быть больше приблизительно в 8 раз (590/72). НУ с шарнирными ярмами (см. п.п. 3 и 5 таблицы) имеют в 1,5 раза больше величины поисковых полей внутри объекта. Отказ от вертикальности направления вектора намагничивания позволил уменьшить силу притяжения магнитов приблизительно в 2,5 раза (120/72), что следует из сравнения п. 2 и п. 5 этой таблицы.

Все намагничивающие устройства по рис. 1 предназначены для локального намагничивания определенного участка металлоконструкции. Для того, чтобы намагнитить следующий участок НУ надо оторвать от поверхности с усилием 20...30 кгс, а в МД-4К до 45 кгс, и переставить на новую позицию. Согласно нормативным документам [2–4] такая перестановка выполняется с шагом кратным ширине полюса вдоль всего сварного шва. НУ должно устанавливаться под разными углами к оси сварного соединения. Поэтому НУ



Т а б л и ц а . Сравнительные характеристики П-образных намагничивающих устройств (НУ) на постоянных магнитах разных производителей

Номер п/п	Тип НУ, производитель, вид гибкого соединения	Технические характеристики			
		Габаритные размеры, мм	Максимальное межполюсное расстояние, мм	Масса, кг	Сила отрыва от стальной пластины, кгс
1	Flawfinder Tipe A, Helling, трос	Ø45×145×680	280	0,83	38
2	МАГЭКС-1П, ИЭС им. Е. О. Патона, трос	Ø35×135×690	340	1,1	28
3	МД-4К, шарнирный магнитопровод	Ø55×50×300	70	2,98	45
4	Flawfinder Tipe N, Германия, шарнирный магнитопровод	Ø32×50×150	250	1,0	30
5	ТВА-5 ИЭС им. Е. О. Патона, шарнирный магнитопровод	Ø30×295	200	1,8	30

## Окончание таблицы

Номер п/п	Тип НУ, производитель, вид гибкого соединения	Технические характеристики			
		Индукция магнитного поля на полюсе $B_n$ , мТл	Тангенциальная составляющая $H_t$ (кА/м) в центре межполюсного расстояния в 100 мм	Поисковое магнитное поле $H_{вн}$ в зазоре шириной 3 мм между пластинами 500×250×12 мм на глубине 6 мм, кА/м	Возможность плавного перемещения одного из полюсов
1	Flawfinder Tipe A, Helling, трос	<b>590</b>	8,0	<b>27,2</b>	Нет
2	МАГЭКС-1П, ИЭС им. Е. О. Патона, трос	120	16,0	30,4	Нет
3	МД-4К, шарнирный магнитопровод	<b>180</b>	17,1	45,3	Нет
4	Flawfinder Tipe N, Германия, шарнирный магнитопровод	–	–	23,0	Нет
5	ТВА-5 ИЭС им. Е. О. Патона, шарнирный магнитопровод	<b>72</b>	<b>11,2</b>	<b>44,8</b>	<b>Есть</b>

по рис. 1,  $\delta$  в отличие от других (1,  $a-z$ ) позволяет изменять непрерывный разнонаправленный поиск различно расположенных дефектов без отрыва полюсов от поверхности контролируемого участка объекта за счет плавного перемещения по ней одного из полюсов. Для этого один из полюсов этого НУ оборудован полюсным наконечником с отжимаемым колесом. С помощью такого НУ легко выполнять разнонаправленное намагничивание.

Все пять сравниваемых НУ представляют собой П-образные магнитные системы, содержащие постоянные магниты, оси между полюсами которых направлены параллельно или перпендикулярно поверхности контролируемого изделия, и разные ярма, соединяющие полюса. Установленные на ферромагнитное изделие такие НУ создают замкнутые магнитные цепи, отдельные участки которых обладают магнитными сопротивлениями, равными  $R_m = F/\Phi = l/\mu S$ , где  $l$  и  $S$  – длина и сечение участка магнитной цепи,  $\mu$  – магнитная проницаемость. НУ формируют вокруг себя развитые магнитные поля (рис. 2) и основные (рис. 3) магнит-

ные потоки  $\Phi_o$ , которые на всех участках последовательной цепи будут одинаковы  $\Phi_o = F/(\sum R_m)$ . Магнитный поток  $\Phi_o$  определяет возможности НУ создавать над дефектом изделия магнитные поля, собирающие магнитный порошок, т. е. формирует индикации дефектов. Таким образом, возможности НУ обнаруживать дефекты прежде всего определяются величиной магнитного потока  $\Phi_o$ .

Очевидно,  $R_y \ll R_t$ . Эта разница зависит от отношения сечений ферромагнитных масс в ярме и тросе. При ярме  $d = 30$  мм это сечение  $S_y = 675$  мм<sup>2</sup>, а в тросе оно составляет только 22,7 мм<sup>2</sup>, т. е. в 30 раз меньше (675/22,7). Приблизительно во столько же раз меньше поисковый поток  $\Phi_o$  в устройствах с тросом. В устройствах с высокими вертикально расположенными колонками из постоянных магнитов (рис. 1,  $a, б$ ) имеется сильно развитое магнитное поле, которое изменяется с изменением межполюсного расстояния.

Сравниваемые магнитные системы имеют разные поля рассеяния  $\Phi_p$ , картины которых показаны на рис. 2.

Расстояние между полюсами НУ выбираются из условия получения достаточно равномерно намагничивания до технического насыщения. С увеличением межполюсного расстояния значение магнитной индукции в изделии уменьшается, поскольку растет общее магнитное сопротивление цепи (рис. 3):

$F = H_c l_{\text{пм}}$  – магнитодвижущая сила (МДС) постоянного магнита как источника магнитного потока  $\Phi$  в цепи, где  $H_c$  – коэрцитивная сила магнита;  $l_{\text{пм}}$  – длина средней магнитной линии магнита в направлении его намагниченности;

$R_{\text{пм}} = l_{\text{пм}} / \mu_0 \mu_{\text{пм}} S_{\text{пм}}$  – внутреннее сопротивление магнита;

$\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума в системе СИ, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$\mu_{\text{пм}}$  – относительная магнитная проницаемость магнита на спинке петли гистерезиса;

$S_{\text{пм}}$  – площадь поперечного сечения магнита;

$R_{\text{м}} = l_{\text{м}} / \mu_0 \mu_{\text{м}} S_{\text{м}}$  – магнитное сопротивление магнитопровода;

$R_{\delta} = \delta / \mu_0 S$  – магнитное сопротивление воздушного промежутка;

$R_{\text{у}} = l_{\text{у}} / \mu_0 \mu_{\text{у}} S_{\text{у}}$  – магнитное сопротивление изделия;

$R_{\text{т}} = l_{\text{т}} / \mu_0 \mu_{\text{т}} S_{\text{т}}$  – магнитное сопротивление троса;

$R_{\text{я}} = l_{\text{я}} / \mu_0 \mu_{\text{я}} S_{\text{я}}$  – магнитное сопротивление яра;

$\Phi_0$  – рабочий магнитный поток.

Из рис. 2 видно, что картины распределения магнитных полей рассеяния сильно отличаются. В случае рис. 2, а имеются мощные магнитные поля вокруг вертикально расположенных постоянных магнитов. С приближением полюсов магнитов друг к другу происходит компенсация встречно направленных магнитных полей рассеяния.

В НУ МД-4К (рис. 1, в) постоянные магниты имеют небольшую высоту, составляющую приблизительно 1/5 часть высоты полюса магнитопровода (в плоскостях, перпендикулярных поверхности контролируемых изделий), и эффект взаимного размагничивания параллельных и встречно направленных магнитных потоков остается, но он существенно

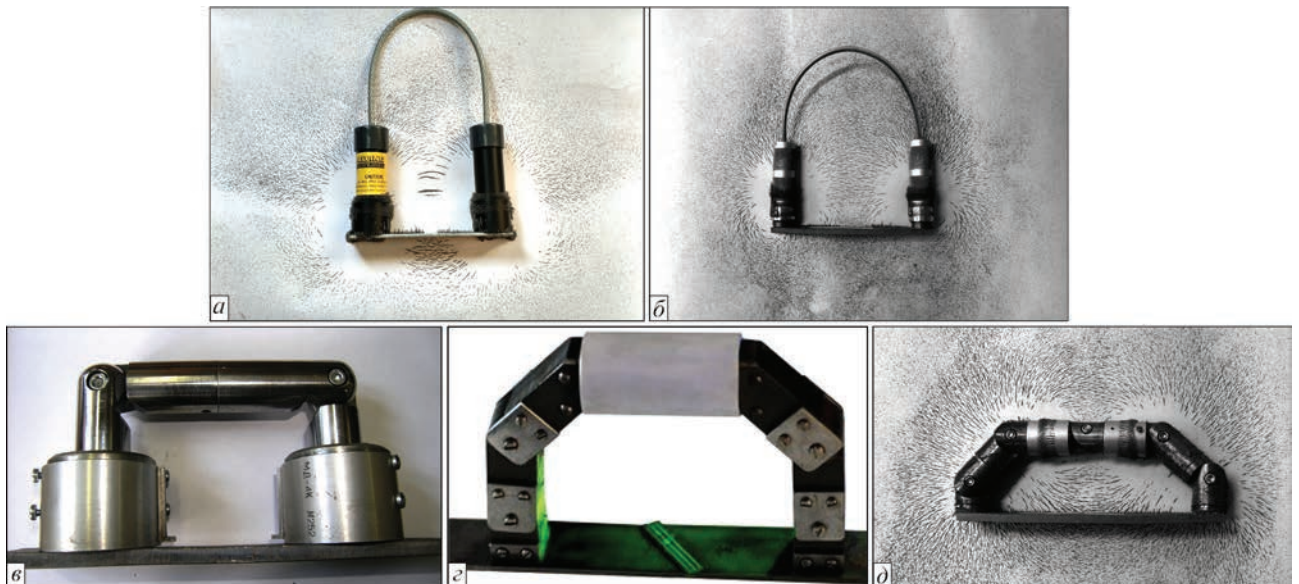


Рис. 1. Типовые конструкции НУ на постоянных магнитах: а – Helling Flaw Finder Type A, трос, Германия; б – МАГЭКС-1, ИЭС им. Е. О. Патона, трос (Украина); в – МД-4К, шарнир (Россия); з – Helling Flaw Finder Type N, шарнир (Германия); д – ТВА-5, ИЭС им. Е. О. Патона, шарнир (Украина)

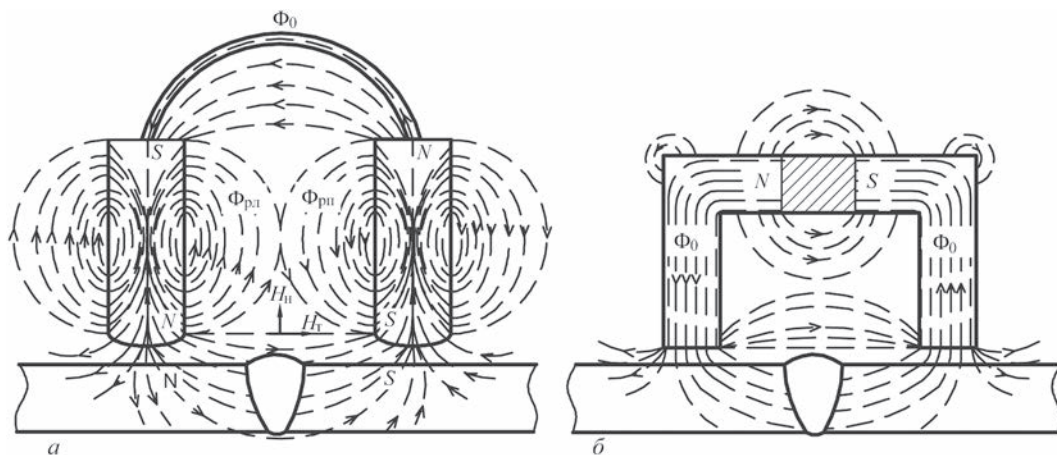


Рис. 2. Распределение магнитных полей в Π-образных системах: а – с тросом; б – с межполюсным яром

меньше. Взаимное влияние нормальных составляющих полей рассеяния приводит к картинам магнитных полей в межполюсном пространстве.

В НУ ТВА-5 (рис. 1, д) магнитопровод выполнен из шарнирно соединенных ферромагнитных элементов диаметром 30 мм. Площадь сечения такого магнитопровода в 30 раз больше, чем у троса, а горизонтальное параллельно поверхности контролируемого изделия расположение магнитов в яме практически исключает магнитные встречно направленные потоки при сближении полюсов.

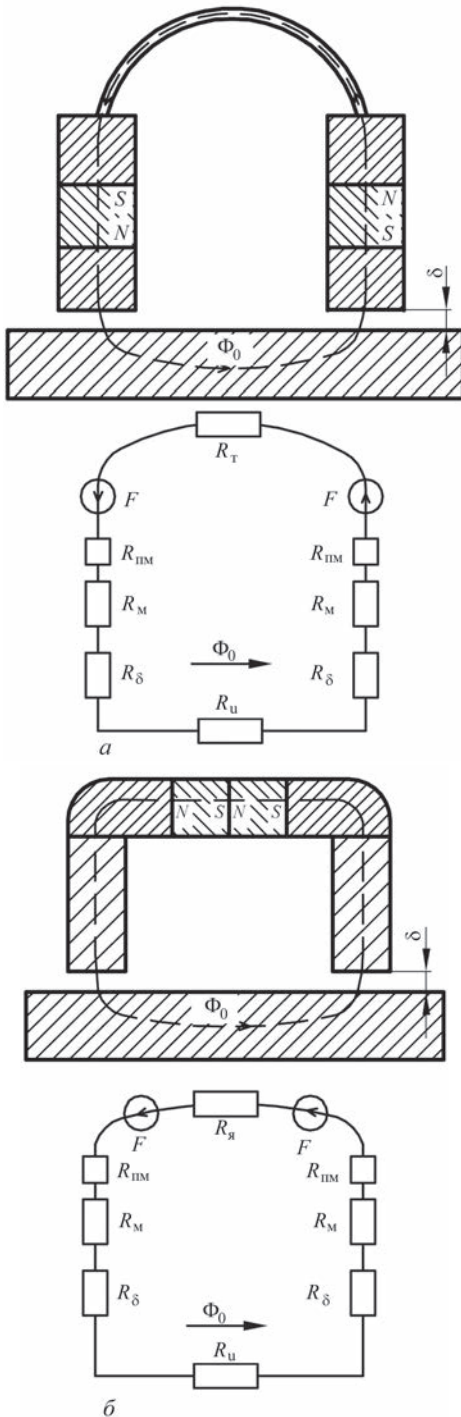


Рис. 3. Магнитные цепи и схемы замещения НУ: а – на тросах (рис. 1, а, б); б – на шарнирных ярах (рис. 1, в–д) (обозначения см. в тексте)

В межполюсном пространстве картина магнитных полей рассеяния не зависит от расстояния между полюсами.

Полюсные наконечники у ТВА-5 могут быть выполнены с возможностью перемещения по поверхности контролируемой детали, т. е. имеют соответствующие колеса.

Эффективность обнаружения дефекта зависит от угла между его преимущественным направлением и направлением магнитного поля. Зависимость чувствительности обнаружения дефекта от его расположения относительно направления магнитного поля представлена на рис. 4 [3].

Дефекты обнаруживаются с максимальной чувствительностью, если они расположены под прямым углом к магнитному потоку  $\Phi_0$ .

Практика показала, что для эффективного выявления несплошностей желательно НУ комплектовать полюсным наконечником (рис. 5) с эксцентрически установленным колесом. Такая конструкция обеспечивает возможность сканирования магнитным потоком тела контролируемого объекта. Возвратно-поступательные движения одного из полюсов способствуют повышению выявляемости разноориентированных трещин. После поисковых движений для обнаружения индикации поворотом эксцентрического колеса НУ переводится в режим оценки индикации, т. е. в режим повышенной тангенциальной составляющей магнитного поля.

Последующим поворотом эксцентрика, а также наличием подпружиненного подпятника на другом полюсе обеспечивается легкий отрыв и снятие НУ с поверхности объекта контроля.

При разработке НУ ТВА-5 учитывалось следующее.

Напряженность магнитного поля, создаваемая НУ, должна обеспечивать намагничивание объекта до состояния технического насыщения.

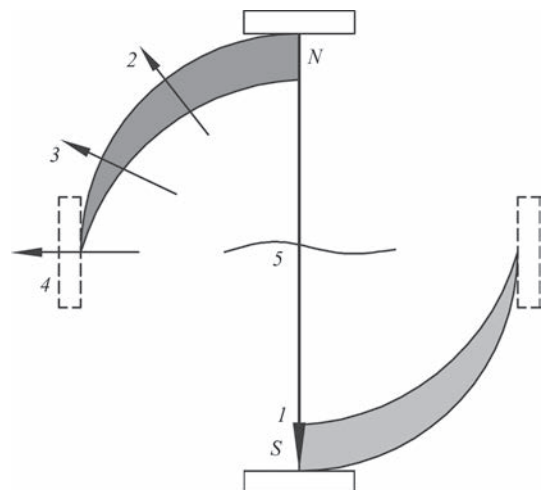


Рис. 4. Эффективность обнаружения трещины 5 в зависимости от направления намагничивания: 1 – максимальная; 2, 3 – пониженная; 4 – минимальная

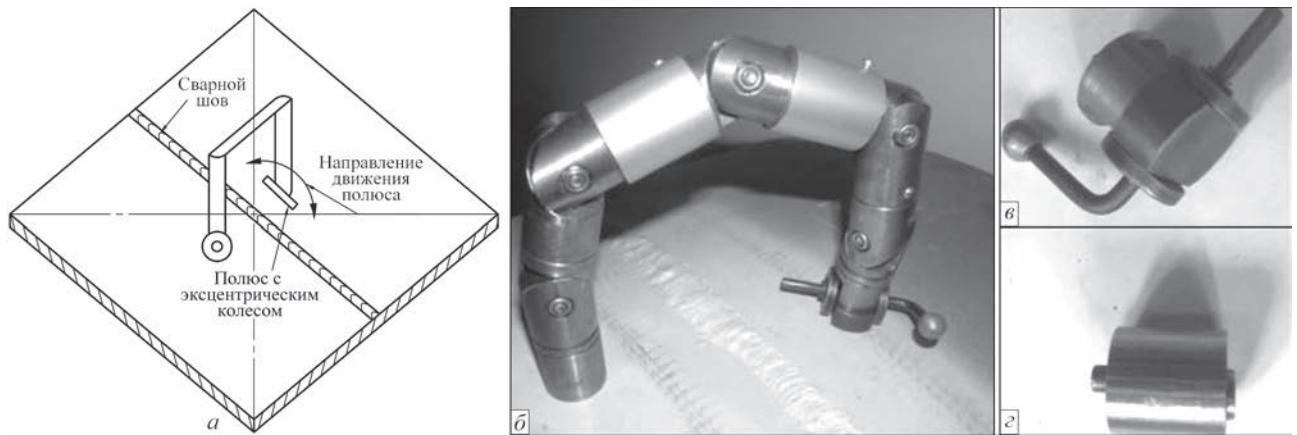


Рис. 5. Схема поиска несплошностей (а) с помощью НУ ТВА-5 (б) с подпружиненным (в) полюсным наконечником и полюсным наконечником с отжимаемым колесом (г)

Масса НУ должна быть минимальной, а подвижность максимальной.

НУ должно удерживаться на вертикальной и потолочной поверхности объекта контроля, имея силу отрыва не менее 20 кгс.

При разработке технологических карт МПК режим намагничивания выбирается в зависимости от магнитных свойств материала проверяемого объекта (величин коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и необходимой чувствительности А, Б или В).

Используя соответствующие справочники по магнитным свойствам сталей, определяют величину коэрцитивной силы  $H_c$  и по графику Приложения 4 ГОСТ 21105-87 вычисляют значение напряженности магнитного поля  $H_c$ , необходимое для получения требуемой магнитной напряженности, которая будет иметь двух-пяти кратное превышение над  $H_c$ .

Чем выше необходимая чувствительность, тем больше должно быть отношение  $H_c/H_c$ . Вместе с тем приложенное поле  $H_c$  должно преодолеть размагничивающие поля формы, дефектов и зазоров.

При намагничивании постоянным магнитом напряженностью  $H_c$  в детали создается размагничивающее магнитное поле, зависящее от формы детали и дефектов, и истинное поле внутри детали равно

$$H = H_c - NJ - N_A J,$$

где  $N, N_A$  – размагничивающие факторы формы детали и дефектов.

Поле внутри меньше приложенного поля  $H_c$ , а с учетом различных «незначительных» немагнитных зазоров на пути магнитного потока, на преодоление которых также требуется МДС, значения  $H$ , еще меньше:

$$H = H_c - NJ - N_A J - N_B J,$$

где  $N_B J$  – составляющая напряженности магнитного поля, необходимая на преодоление воздушных зазоров между полюсами, изделием и элементами магнитопровода, например, между постоянными магнитами и тросом.

Считая, что поскольку силовые линии магнитного поля в воздухе нормальны к поверхности тел из ферромагнитных материалов, и основываясь на равенстве  $H_t$  на поверхности и  $H_{вн}$  под поверхностью изделия, путем измерения  $H_t$  у поверхности изделия в нейтральной плоскости НУ можно определить  $H_{вн}$  подповерхностное (внутреннее) поле в изделии.

Контрольным параметром режима намагничивания является напряженность магнитного поля на поверхности изделия и, в соответствии с работами [5, 6], рекомендуемая тангенциальная составляющая  $H_t$  напряженности на контролируемой поверхности, измеренная датчиком Холла, расположенным перпендикулярно этой поверхности, должна составлять от 2 до 6 кА/м. Это справедливо при контроле изделий из малоуглеродистых и низколегированных сталей, типовое значение магнитной индукции насыщения которых находится в пределах от 1,6 до 2,0 Тл.

Для уверенного выявления трещин и других дефектов необходимо, чтобы отношение  $H_n$  к  $H_t$ , называемое критерием выявляемости  $\theta = H_n/H_t$ , не превышало трех, т. е.  $\theta < 3$ .

НУ по рис. 1, а–в на участках протяженностью примерно 25 мм, прилегающих к магнитным полюсам, из-за большого значения  $\theta$  дефекты практически не выявляются.

Основными параметрами НУ на постоянных магнитах являются:

напряженность магнитного поля на полюсах вне ферромагнитной массы объекта;

составляющие напряженности магнитного поля рассеяния в центре между полюсами как вне, так и на поверхности изделия, зависящие от толщины, формы изделия, свойств ферромагнитности объекта;

напряженность магнитного поля в зазоре между подвижным полюсом и объектом в период поиска и в период оценки дефекта;

механическое усилие отрыва полюсов от ферромагнитной поверхности, которое пропорцио-

нально квадрату индукции в зазоре и площади полюса:  $F_{\text{max}} = B^2 S / 2\mu$ , должно быть не меньше 20...30 кгс.

Эти сравнительные данные приведены в таблице. Они для устройств на рис. 1, а, д получены по следующей программе измерений:

- в воздушном межполюсном пространстве;
- на поверхности контролируемой стальной пластины 500×250×12 мм;
- в трехмиллиметровом зазоре между двумя такими пластинами на глубине 6 мм от поверхности;
- на стальном образце с искусственными подповерхностными дефектами.

При испытаниях эти НУ поочередно устанавливали на неферромагнитном стенде с одинаковым межполюсным расстоянием 100 мм и последующим измерением миллитесламетром МТУ-1 с датчиком Холла через каждые 10 мм от нейтральной оси НУ тангенциальной  $B_T$  и нормальной  $B_H$  составляющих индукции магнитного поля.

Результаты измерений отдельных составляющих магнитного поля представлены в виде графиков (рис. 6).

Следующую серию сравнительных измерений проводили на стальной пластине 500×250×12 мм

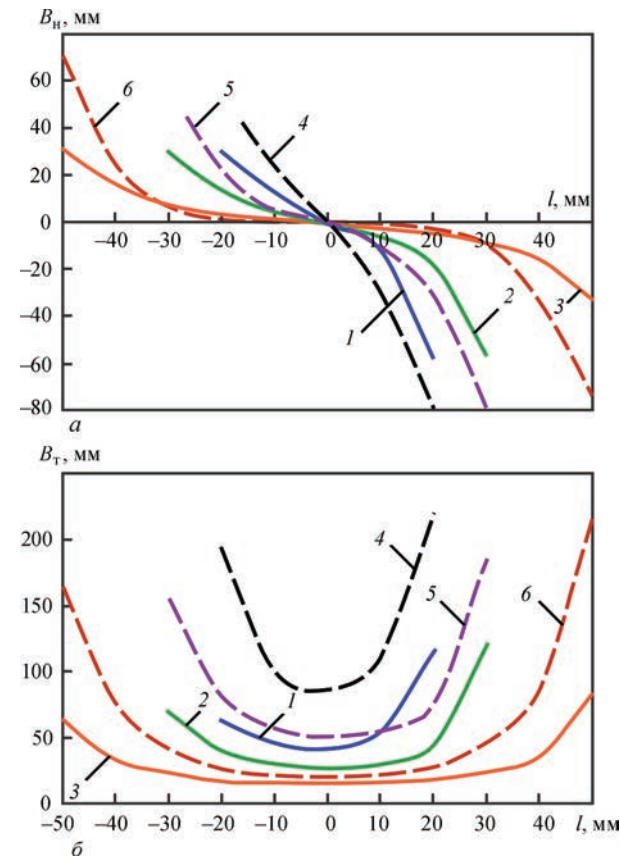


Рис. 6. Распределение нормальной  $B_H$  (а) и тангенциальной  $B_T$  (б) составляющих магнитной индукции в межполюсном воздушном пространстве намагничивающих устройств ТВА-5 (кривые 1, 2, 3) и Flawfinder Type A (4, 5, 6) (трос), располагаемых вне ферромагнитных объектов при расстоянии между полюсами 40, 60 и 100 мм, соответственно

с измерением  $B_H$  и  $B_T$  в центре пластины при расположении полюсов НУ на расстоянии 40, 60 и 100 мм.

Тангенциальная  $B_T$  составляющая индукции на поверхности пластины измерялась миллитесламетром МТУ-1 при расстоянии датчика Холла  $t = 0,8$  мм от поверхности.

Из рис. 6 следует, что с приближением полюсов друг к другу возрастает нормальная и тангенциальная составляющая магнитного поля. Причем увеличение  $B_H$  и  $B_T$  в конструкции с тросом в 2...3 раза интенсивнее, чем в случае шарнирного яра. Абсолютные величины  $B_H$  и  $B_T$  зависят от силы притяжения полюсов.

При расположении НУ на поверхности ферромагнитного изделия (рис. 7) в несколько раз снижается  $B_H$  и  $B_T$ , сильно искажаются кривые распределения нормальной составляющей  $B_H$  поля рассеяния.

Сокращение расстояния между полюсами (сближение полюсов) приводит к росту по мо-

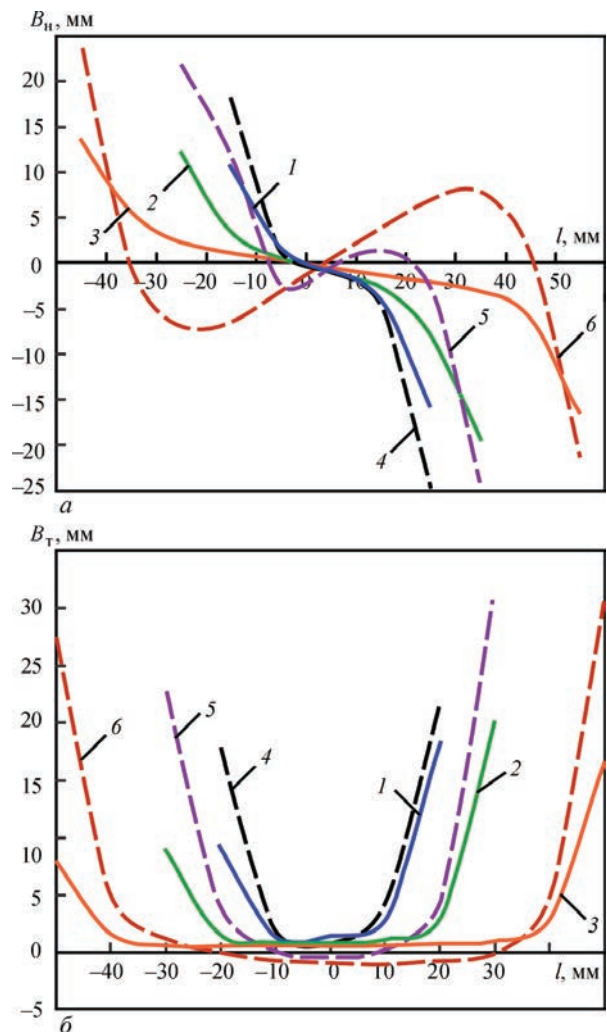


Рис. 7. Распределение нормальной  $B_H$  (а) и тангенциальной  $B_T$  (б) составляющих магнитной индукции на стальной пластине при расположении полюсов НУ на расстоянии 40, 60 и 100 мм, соответственно: ТВА – 5 (1, 2, 3) и Flawfinder Type A (4, 5, 6)

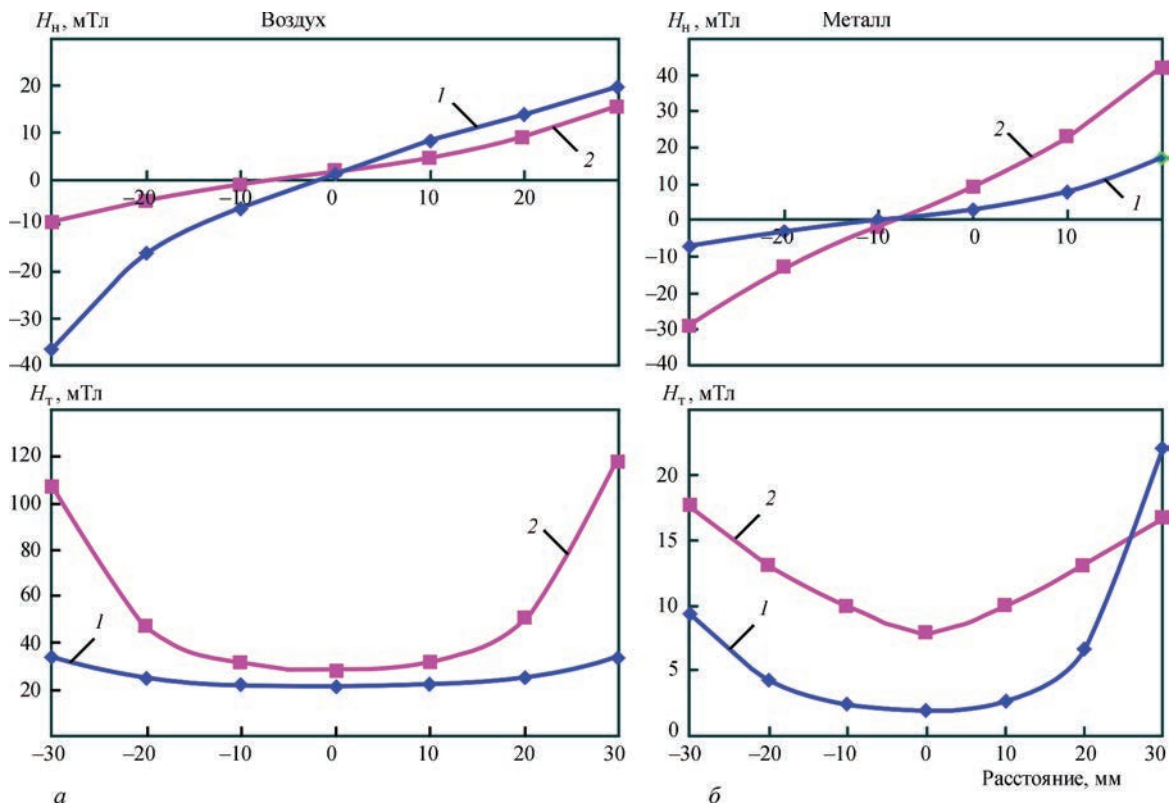


Рис. 8. Распределение составляющих напряжений  $H_n$  и  $H_t$  намагничивающих устройств типа ТВА-5 (кривая 1) и МД-4К (кривая 2) при расстоянии между полюсами 60 мм: а – вне ферромагнитных масс (воздух); б – на поверхности ферромагнитного объекта (металл)

дулю тангенциальной составляющей индукции  $B_t$  и уменьшению роста нормальной  $B_n$  составляющей. Очевидно, кривые  $B_n$  зависят от размеров и массы ферромагнитного изделия.

Используя данные измерений  $H_n$  для соответствующих межполюсных расстояний, можно рассчитать значение величины  $\theta$  в отдельных точках межполюсного расстояния, которые в опытах устанавливали: 40, 80 и 100 мм. Для НУ с тросом (рис. 1, а) величины  $\theta_a = 2,8; 1,1; 3,7$ . Для НУ на рис. 1, б величины  $\theta_b = 1; 0,9; 2$ .

НУ с тросом имеют два принципиальных недостатка: большое магнитное сопротивление и вертикальное расположение осей магнитов. В НУ (МД-4К) (рис. 1) один из этих недостатков исключен. Здесь трос заменен шарнирным ярмом, но сохранена вертикальность направления вектора намагничивания. Из таблицы видно, что шарнирное ярмо обеспечило этому НУ большое поисковое магнитное поле.

Изучено также влияние на нормальную составляющую поля вертикальности расположения оси намагничивания полюсов.

На рис. 8 показаны графики распределения нормальной  $H_n$  и тангенциальной  $H_t$  составляющих вне ферромагнитной массы. Обе эти составляющие у МД-4К больше, чем у ТВА-5 в 4 раза, так как в МД-4К установлены более мощные магниты. На ферромагнитном изделии нормальные составляющие  $H_n$  остались прежней величины, а тангенциальные составляющие  $H_t$  уменьшились,

так как были зашунтированы ферромагнитной массой магнитопровода. Отношения  $\theta = H_n/H_t$  вблизи полюсов для МД-4К на воздухе  $H_n/H_t = 40/100 = 0,4$ , а на изделии  $H_n/H_t = 42/15 = 2,8$ . Для ТВА-5 на воздухе  $H_n/H_t = 10/35 = 0,28$ , на изделии  $H_n/H_t = 15/25 = 0,6$ . С приближением к центру межполюсного пространства  $H_n \rightarrow 0$ .

Третью серию испытаний проводили на стенде, представляющем собой две стальные пластины 500×250 мм, толщиной 12 мм (рис. 9), между которыми устанавливался с помощью немагнитной вставки зазор приблизительно 3 мм, равный толщине датчика Холла миллитесламетра. Таким образом, появилась возможность измерять тангенциальную (внутреннюю) составляющую внутри

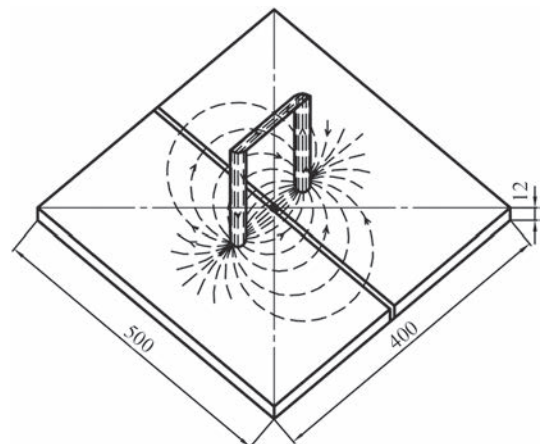


Рис. 9. Схема стенда для измерения поля внутри металла

металла, т.е. ту составляющую магнитного поля, которая выявляет дефекты.

Распределение магнитных полей в пластинах приведено на рис. 10.

Измеренные поисковые магнитные поля  $H_{вн}$  в зазоре шириной 3 мм между пластинами, приведенные в таблице, показывают превышение  $H_{вн}$  в НУ с монолитным ярмом над аналогичными полями НУ с тросом в 1,47...1,66 раза.

Увеличивая у стенда (рис. 9) величину зазора по 0,5 мм, записывали значения величин индукций в зазоре НУ ТВА-5 и МАГЭКС-1П. Далее с помощью графиков на рис. 11 получили значения магнитного потока  $B_T \cdot S$  внутри монолитной пластины  $500 \times 250 \times 12$  мм при 60, 80, 100 мм полюсных расстояниях в их центре. Удаляя друг от друга магнитные полюса от 60 мм к 100 мм магнитное поле внутри ТВА-5 изменяется мало, а в случае НУ с тросом оно уменьшилось с 70 до 60 мТл. С удалением полюсов друг от друга вводятся дополнительные зоны металла с их магнитными сопротивлениями и с перераспределением магнитных полей рассеяния. Отсюда следует, что магнитные полюса в случае троса своими полями рассеяния компенсируют друг друга, когда они расположены на малом расстоянии. При удалении полюсов друг от друга картина распределения нормальной составляющей превращается в синусоиду.

Следующая серия экспериментов была проведена для получения наглядности и сравнения степени выявля-

емости внутренних дефектов изучаемых видов НУ. Для этого был изготовлен образец, показанный на рис. 12. Образец выполнен из конструкционной стали со сверлениями диаметром 1 мм на разных глубинах от поверхности.

Фотографии четырех НУ, расположенных на данном образце, и соответствующие индикации показаны на рис. 13. Всеми НУ были выявлены несплошности, находящиеся на середине межполюсного расстояния и только НУ ТВА-5 выявлены несплошности, расположенные вблизи полюсов, т.е. это НУ способно находить внутренние дефекты во всем межполюсном пространстве на глубине до 6 мм при диаметре отверстий 1 мм (рис. 13).

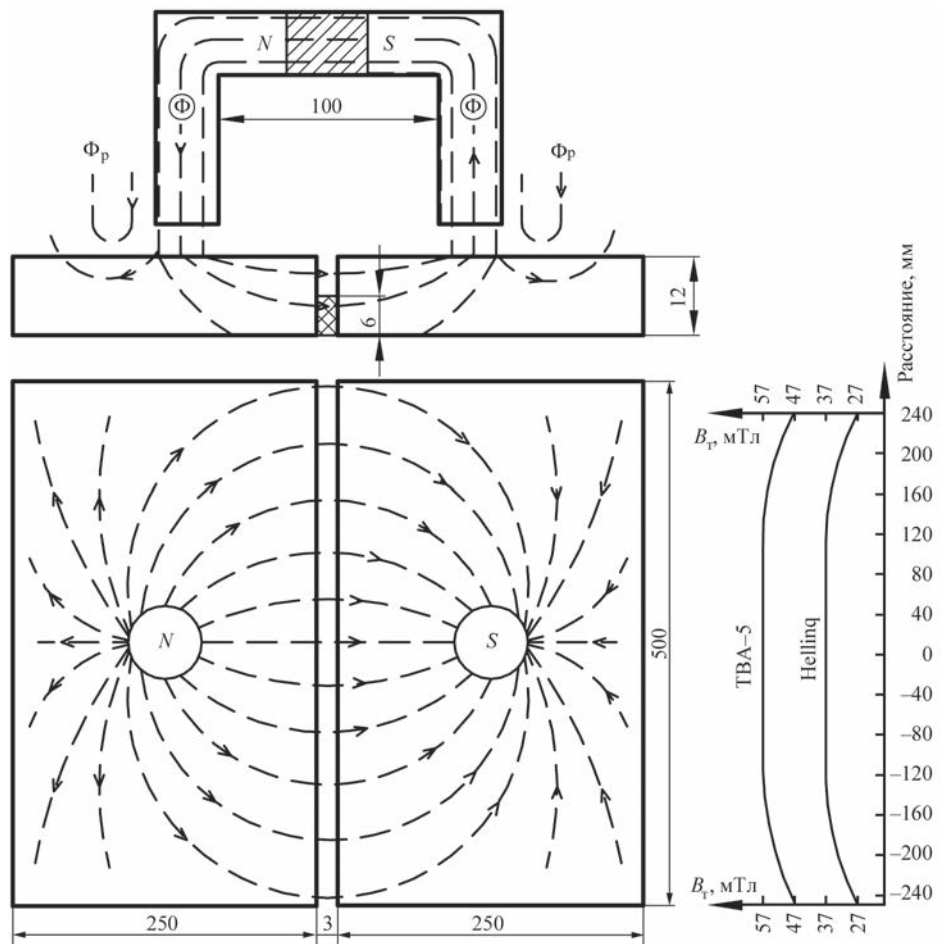


Рис. 10. Распределение магнитных полей в габаритной ферромагнитной пластине

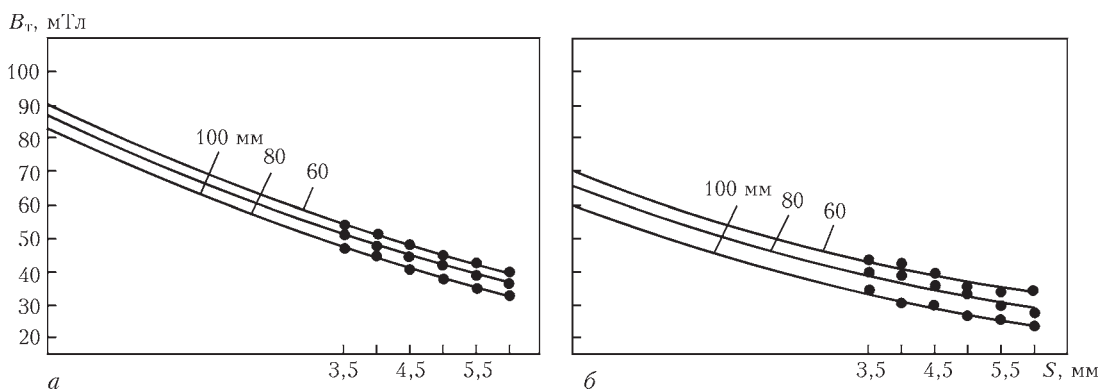


Рис. 11. Значения  $B_T$  на поверхности пластины, полученные путем экстраполяции: а – ТВА-5; б – МАГЭКС-1П

Из испытанных НУ первые два с тросом (рис. 1, а, б) мало отличаются друг от друга как конструктивно, так и технологически. Они имеют невысокие показатели выявляемости из-за сильно развитой нормальной составляющей магнитного поля. Устройство ТВА-5 (рис. 1, д) в сравнении с другими НУ имеет:

показатель выявляемости  $\theta \ll 3$  во всем межполюсном пространстве, тогда как другие НУ имеют  $\theta$  меньше 3 преимущественно в центре межполюсного пространства;

в 8,2 раза меньшую индукцию на полюсах;

поисковая составляющая магнитного поля в зазоре между стальными пластинами  $500 \times 250$  на глубине 6 мм (пластины 12 мм) в 1,6 раза больше, чем у других дефектоскопов.

Из описанных исследований следуют выводы.

1. Мнение, что чем больше сила отрыва от поверхности контролируемого изделия, тем лучше НУ неверное. Из таблицы следует, что наибольшую силу отрыва необходимо прикладывать к НУ, у ко-

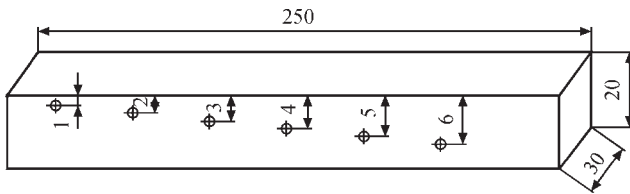


Рис. 12. Испытательный образец с искусственными дефектами в виде сквозных отверстий диаметром 1 мм

торого индукция на полюсах очень большая, но при этом технологическая эффективность малая. У всех НУ сила отрыва приблизительно одинаковая (отличается на 10...20%), а индукция на полюсах отличается в несколько раз, т. е. эффективность НУ зависит, прежде всего, от конструкции устройства.

2. Решающее значение для выявления дефектов имеет не тангенциальная составляющая, измеренная на поверхности объекта между полюсами, а поисковое магнитное поле внутри металла. В данных опытах – магнитный поток в зазоре между массивными стальными пластинами. То НУ лучше, у которого этот магнитный поток больше. Если трос заменен на шарнирное ферромагнитное ярмо, то магнитный поток внутри значительно возрастает.

3. Все сравниваемые НУ вне контролируемого изделия имеют приблизительно одинаковые картины распределения отдельных составляющих магнитного поля (рис. 6). На ферромагнитном изделии кривые распределения тангенциальной индукции приблизительно сохраняют свою форму, тогда как распределение нормальной ( $B_n$ ) составляющей в случае троса (Flawfinder, МАГЭКС) претерпевает синусоидальные изменения. Они сильно увеличиваются в зонах 1/4 и 3/4 расстояния между полюсами. Это объясняется влиянием ферромагнитной массы изделия. Очевидно, это возрастание нормальной составляющей зависит от формы изделия и расстояния между полюсами. Устройства с тросом кривую распределения име-

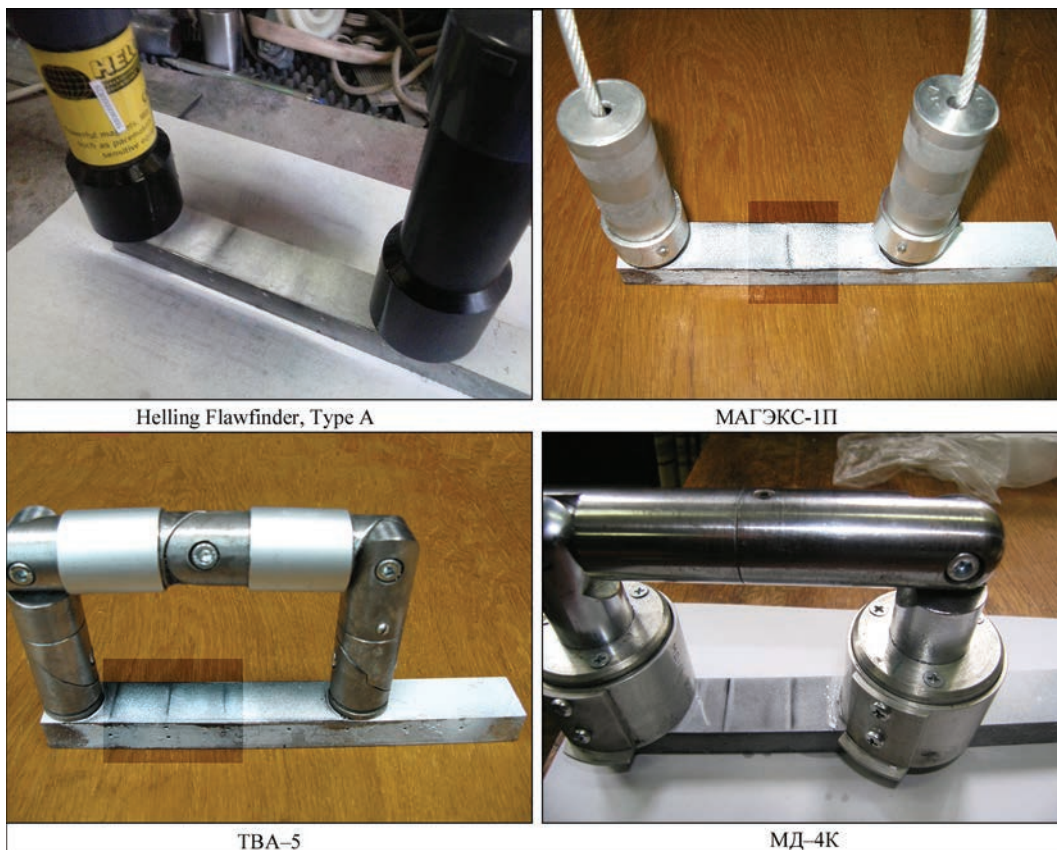


Рис. 13. Сравнимые намагничивающие устройства, установленные на испытательном образце с искусственными дефектами



ют похожую на форму распределения  $H_n$  с шарнирными ярмами только после уменьшения межполюсного расстояния до 60 мм.

4. Из сравниваемых данных, приведенных в таблице п.п. 1, 2, следует, что широко распространенные НУ с тросом могут иметь существенно разные технические показатели. При равных величинах поисковых магнитных полей внутри металла 27,2 и 30,4 кА/м, сила отрыва у них 38 и 28 кгс, при максимально возможных полюсных расстояниях 280 и 340 мм и при индукциях на полюсах 590 и 120 мТл. Из-за неудачных конструктивных решений разработчикам НУ по п. 1 таблицы для получения удовлетворительных технологических показателей потребовалось увеличить магнитную индукцию на полюсах приблизительно в 5 раз и силу отрыва на 10 кгс.

По данным инспекционного контроля ОСП «Укрэксперт» НУ с постоянными магнитами, соединенными тросом, широко используются на многих предприятиях Украины. Многие из них были произведены более полувека назад, изготовлены с постоянными магнитами из литых сплавов типа ЮНДК, альнико, тикональ и альни, имеющих  $H_c = 40...200$  кА/м и  $(BH)_{max} = 7...80$  МДж/м<sup>3</sup> при  $B_r = 0,35...0,65 T_d$  или из бариевых ферритов, имеющих  $H_c = 160...200$  кА/м и  $(BH)_{max} = 6,0...25,0$  МДж/м<sup>3</sup> при  $B_r = 0,2...0,4$  Тл, по магнитным свойствам значительно уступают НУ с постоянными магнитами на основе редкоземельных сплавов железо-бор-неодим или самарий-кобальт последних годов выпуска, имеющим  $H_c = 780...1000$  кА/м и  $(BH)_{max} = 220...350$  МДж/м<sup>3</sup> при  $B_r = 0,9...1,33$  Тл [5].

При контроле массивных толстостенных деталей, намагничиваемых такими НУ ранних выпусков, дефекты часто не выявляются из-за низкой напряженности магнитного поля. Это объясняется тем, что постоянные магниты имели первоначально малую МДС или размагнитились вследствие соударений, от попадания в зону температур выше 80 °С. Например, на неостывший сварной шов. Такие постоянные магниты подлежат замене на современные. ИЭС им. Е. О. Патона является разработчиком НУ с постоянными магнитами и ведет работы по их замене на современные, более эффективные.

#### Список литературы

1. Троицкий В. А. (2002) *Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин*, Киев. Феникс.
2. ГОСТ 21105-87. *Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод*.
3. ДСТУ EN ISO 17638:2014. *Контроль неразрушающий сварных соединений. Контроль магнитопорошковый*.
4. EN ISO 9934 часть 1, 2, 3. *Контроль магнитопорошковый*.
5. Герасимов В. Г. (ред.) (1980) *Электротехнический справочник*. 3 т. . Москва, Энергия.

#### References

1. Troitsky, V.A. (2002) *Magnetic particle testing of welded joints and machine parts*. Kiev, Fenix [in Russian].
2. GOST 21105-87: *Non-destructive testing. Magnetic particle method* [in Russian].
3. DSTU EN ISO 17638:2014: *Non-destructive testing of welds. Magnetic particle testing* [in Russian].
4. EN ISO 9934, Pt. 1,2,3: *Magnetic particle testing* [in Russian].
5. (1980) *Electrotechnical reference book*. Ed. by V.G. Gerasimov. In: 3Vol. Moscow, Energiya [in Russian].

В. О. ТРОЙЦКИЙ, В. М. ГОРБИК, О. С. БОРОДАЙ

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ. 03150, м. Київ-150,  
вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ СИСТЕМ НАМАГНІЧУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ МАГНІТОПОРОШКОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

Розглянуто типові конструкції існуючих намагнічуючих пристроїв на постійних магнітах, які використовуються при магнітопорошковому методі контролю. Відзначено недоліки намагнічуючих пристроїв з гнучким з'єднанням полюсів сталевим тросом і показані переваги пристроїв, в яких це з'єднання виконано гнучким шарнірним магнітопроводом (ярмом). Представлені результати вивчення розподілу магнітних потоків в системах з тросом і міжполюсним ярмом. Також наведені технічні характеристики намагнічуючих пристроїв, що серійно випускаються. Представлені результати аналізу ефективності виявлення дефектів намагнічуючих пристроїв з шарнірним магнітопроводом. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 13.

Ключові слова: магнітопорошковий контроль; намагнічуючий пристрій; постійний магніт; магнітний потік; магнітне поле; магнітна індукція

#### COMPARISON OF DIFFERENT SYSTEMS OF MAGNETIZING DEVICES WITH CONSTANT MAGNETS FOR MAGNETIC PARTICLE TESTING

V. A. TROITSKII, V. M. GORBIK, O. S. BORODAI

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazimir Malevich Str., Kiev, 03150  
E-mail: office@paton.kiev.ua

Typical designs of existing constant magnet magnetizing devices, used in magnetic-particle testing, are considered. The disadvantages of magnetizing devices with flexible connection of the poles by steel cable are noted and the advantages of the devices, in which this connection is made by flexible pivot magnetic core (yoke), are shown. The results of research of magnetic flows distribution in the systems with cable and interpole yoke are presented. Specifications of serially produced magnetizing devices are also given. Presented are the results of efficiency of flaw detection using magnetizing devices with pivot magnetic core. 5 Ref., 1 Tabl., 13 Fig.

Keywords: magnetic particle testing, magnetizing devices, constant magnet, magnetic flow, magnetic field, magnetic induction

Поступила в редакцію  
13.11.2017

## УЛУЧШЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ СЕНСОРОВ

И. В. БОГАЧЕВ, Л. В. МЕЛЕЩЕНКО

Институт технической теплофизики НАН Украины. 03057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2а. E-mail: biv\_vdoc@ukr.net

Рассмотрены различные конструкции ультразвуковых преобразователей, использующих магнитострикционный эффект и имеющих малую площадь излучающей поверхности (диаметр волновода  $0,3 \dots 1,0$  мм), что позволяет создать в контролируемом образце полусферическую (ненаправленную) продольную волну при зондирующем радиоимпульсном сигнале. Приведена схема стенда, с помощью которого можно определить основные характеристики и параметры составляющих элементов магнитострикционных сенсоров. Проанализировано влияние различных факторов и параметров на чувствительность и мощность излучения преобразователей. Высокая чувствительность сенсоров достигается также за счет использования специальных материалов с высокими значениями коэффициента магнитострикции и магнитострикции насыщения, которые подвергаются определенной технологической обработке. Рассмотрены способы обеспечения акустического контакта между сенсорами и объектами контроля. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* диаграмма направленности, акустический контакт, малоапертурные магнитострикционные сенсоры

Практический интерес представляет создание систем неразрушающего контроля высоконагруженных объектов сложной формы, таких, например, как лопатки турбин, лонжероны лопастей летательных аппаратов, тонкостенные элементы несущих конструкций и многое другое. Важным объектом контроля является сам ультразвуковой преобразователь диагностических систем. В подавляющем большинстве случаев это пьезоэлектрические преобразователи. Практически все методы измерения характеристик таких преобразователей, используемые в настоящее время, предполагают проведение интегральных (усредненных) по площади измерений параметров с использованием стандартных образцов и в дальней зоне акустического поля преобразователя. Однако для более точного измерения характеристик преобразователей, для обнаружения локальных дефектов, возникающих при их изготовлении, необходимо проводить дифференциальные измерения контролируемых параметров по поверхности преобразователя, что дает возможность определить причины отклонения параметров от номинальных значений и усовершенствовать технологические процессы изготовления преобразователей.

Для систем неразрушающего контроля вышеперечисленных объектов нужны малоапертурные ультразвуковые преобразователи, площадь рабочей поверхности которых гораздо меньше, чем у контролируемых образцов.

Магнитострикционные преобразователи, которые излучают продольные, поперечные, торсионные волны, широко используются в системах неразрушающего контроля [1, 2]. В подавляющем

большинстве они имеют значительные размеры излучающей поверхности.

Для решения вышеперечисленных задач авторами разработаны ультразвуковые преобразователи (рис. 1), использующие магнитострикционный эффект и имеющие малую площадь излучающей поверхности  $0,07 \dots 0,8$  мм<sup>2</sup> (диаметр волновода  $0,3 \dots 1,0$  мм), что позволяет создать в контролируемом образце полусферическую (ненаправленную) продольную волну при зондирующем радиоимпульсном сигнале с частотой заполнения  $0,5 \dots 2,5$  МГц [3]. На рисунке обозначено: 1 – корпус; 2 – ультразвуковое зеркало; 3 – волновод из магнитострикционного материала; 4 – катушка возбуждения; 5 – постоянный магнит; 6 – демпфер; 7 – разъем.

Основные параметры и характеристики магнитострикционных сенсоров (МСС) существенно зависят от конструкции самого сенсора, от точности изготовления его элементов и частей и от технологических процессов подготовки материалов, из которых изготавливается сенсор.

Для малоапертурных сенсоров одной из самых важных задач является обеспечение максимальной чувствительности [4]. Определению оптимальных параметров и характеристик преоб-

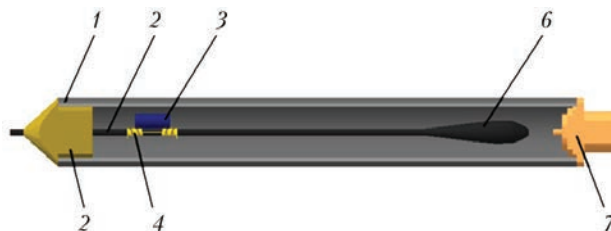


Рис. 1. Ультразвуковой малоапертурный МСС (обозначения см. в тексте)

разователей для решения поставленной задачи посвящена данная работа.

На рис. 2 изображена схема стенда, с помощью которого определялись основные характеристики и параметры составляющих элементов МСС.

На одном волноводе расположены два МСС: один излучающий, а второй – принимающий. При подаче импульса тока возбуждения в катушку излучателя на участке волновода под этой катушкой вследствие эффекта Джоуля возбуждается продольная ультразвуковая волна, распространяющаяся в обе стороны по волноводу. Волна, распространяющаяся влево, отражается от левого торца волновода и снова по волноводу распространяется вправо. Волна, распространяющаяся вправо, вследствие эффекта Виллари, наводит ЭДС в катушке приемника через время  $t_p$ , пропорциональное  $l_0$ . Распространяясь далее, волна отражается от правого торца волновода и начинает двигаться в обратном направлении. Расстояния между излучателем, приемником и торцами волновода выбраны следующим образом:  $l_1 \leq l_2$ . Тогда первый пришедший на принимающий МСС радиоимпульс прошел расстояние  $l_0$ , второй –  $l_1 + l_0$ , третий –  $l_2 + l_0$  и так далее. Торцы волновода зашлифованы для получения хороших отражающих свойств.

На рис. 3 изображена осциллограмма сигнала на катушке приемника.

Первый эксперимент был проведен с разными видами катушек в принимающем МСС: катушка № 1 – двухсекционная, аналогичная катушке излучателя; катушка № 2 – 4-х секционная; катушка № 3 – односекционная, катушка № 4 – односекци-

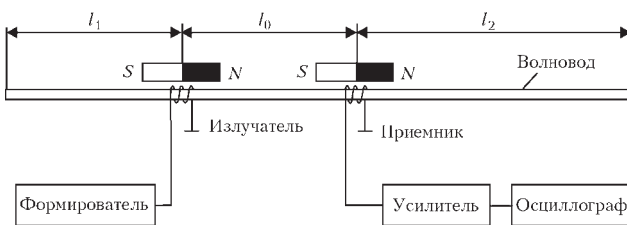


Рис. 2. Схема стенда для определения основных характеристик и параметров МСС

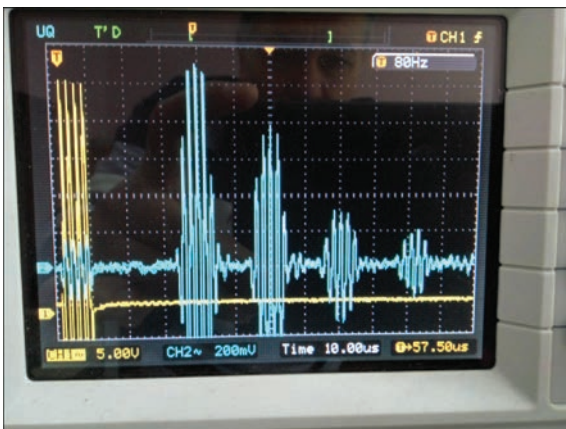


Рис. 3. Осциллограмма сигнала на выходе принимающего МСС

онная двухслойная, катушка № 5 – односекционная. Первые четыре катушки намотаны непосредственно на волновод, а пятая катушка намотана на изолирующий слой из фторопластовой пленки толщиной 0,15 мм. Каждая секция катушек содержит 20 витков обмоточного медного провода диаметром 0,10 мм. Катушка № 4 содержит два слоя по 20 витков. Смежные секции в катушках намотаны в противоположных направлениях. Излучающий преобразователь во всех экспериментах содержит двухсекционную однослойную катушку.

Очень важно понять, как влияет форма катушки на величину сигнала приемника, какова эффективность второго слоя, а также как влияет дополнительный изолирующий слой между волноводом и обмоткой на величину принятого сигнала.

В таблице приведены значения амплитуд соответствующих принятых радиоимпульсов для цилиндрического волновода диаметром 1 мм, где  $U_1$  – амплитудное значение напряжения на катушке излучателя;  $U_{21}$  – амплитудное значение напряжения первого принятого импульса на катушке приемника;  $U_{22}$  – амплитудное значение напряжения второго принятого импульса на катушке приемника;  $U_{21}/U_1$  – коэффициент двойного преобразования;  $Z_k$  – модуль электрического импеданса катушки.

Проведенные эксперименты показали, что амплитуда принятого сигнала практически пропорциональна количеству секций в катушке. При этом за счет намотки смежных секций в противоположных направлениях электрический импеданс изменяется не пропорционально квадрату общего числа витков, а пропорционально первой степени их количества за счет влияния взаимной индуктивной связи между секциями.

Из полученных результатов видно, что увеличение расстояния между волноводом и катушкой на 0,15 мм приводит к уменьшению амплитуды принятого сигнала в два раза. Следовательно, витки необходимо располагать как можно ближе к волноводу.

Для двухслойной катушки № 4 видно, что напряжение принятого импульса увеличилось в 1,6 раза, а электрический импеданс – в четыре. Так как энергия принятого импульса пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна электрическому импедансу, то можно сделать вывод, что эффективность такой катушки значительно уменьшилась за счет удаления второго слоя обмотки от волновода на величину первого слоя.

Значения величин  $U_{22}$  необходимы для определения величины затухания ультразвукового сигнала в волноводе. Уменьшение сигнала происходит за счет дополнительного двукратного прохождения участка волновода  $l_1$ .

Измерив время задержки между первым и вторым принятыми импульсами, можно определить

Результаты измерений амплитуд сигналов на катушках магнитострикционных сенсоров

Катушка приемника	$U_{11}$ , В	$U_{21}$ , мВ	$U_{22}$ , мВ	$U_{21}/U_1$	$Z_k$ , Ом
№ 1	6	40	35	0,0067	12
№ 2	6	80	70	0,0133	24
№ 3	6	20	17	0,0033	6
№ 4	6	32	27	0,0053	24
№ 5	6	10	09	0,0017	6

скорость распространения продольной ультразвуковой волны в волноводе.

При этом скорость и затухание продольной ультразвуковой волны в волноводе можно определить из следующих выражений:

$$c_l = \frac{l_0}{\tau_{12}}; \beta = \frac{20 \lg U_{21} / U_1}{l_0},$$

где  $\tau_{12}$  – время задержки между излученным и первым принятым импульсами;  $c_l$  – скорость распространения продольной ультразвуковой волны в волноводе.

Зависимость акустического давления от времени в любой точке волновода описывается следующим выражением:

$$P(t, x) = u_1(t+x/c_l) K e^{-\beta x},$$

где  $u_1$  – напряжение на катушке излучателя;  $K$  – коэффициент электромеханической связи;  $\beta$  – коэффициент затухания ультразвукового сигнала в волноводе;  $x$  – расстояние от катушки излучателя до произвольной точки на волноводе.

Второй эксперимент был проведен с целью определения материалов и состава акустического зеркала, которое должно надежно крепить волновод к корпусу и при этом иметь акустический импеданс, значительно отличающийся от импеданса волновода. Для этого были залиты различными смесями тестовые кольцеобразные образцы (см. рис. 4):

образец № 1 (две шт.) – эпоксидная смола ЭД-20, наполненная вспученным перлитом (два верхних кольца);

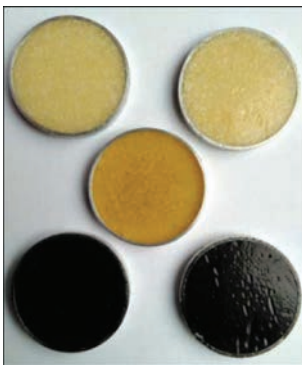


Рис. 4. Тестовые кольца для проверки материала акустического зеркала

образец № 2 (одна шт.) – чистая эпоксидная смола ЭД-20 (среднее кольцо);

образец № 3 (две шт.) – эпоксидная смола ЭД-20, наполненная сажой (два нижних кольца).

Наполнители добавлялись в максимальном количестве, при котором компанды еще сохранял текучесть.

Ультразвуковой сигнал пропускаться через полученные образцы. Для излучения и приема сигналов использовались МСС, изготовленные согласно рис. 1, залитые чистой эпоксидной смолой ЭД-20 с односекционными однослойными катушками.

Исследования показали, что наибольшее ослабление сигнала было получено у образцов № 1. Образцы № 2 и № 3 имели практически одинаковый коэффициент затухания ультразвукового сигнала.

Согласно полученным экспериментальным данным были изготовлены высокочувствительные МСС, фотографии внутреннего модуля и внешнего вида которых приведены на рис. 5.

Высокая чувствительность сенсоров достигается также за счет использования специальных материалов с высоким значением коэффициента магнитострикции и магнитострикции насыщения, которые подвергаются определенной технологической обработке [4].

Принимающий конец волновода сенсора может быть зашлифован заподлицо, а может выступать на несколько миллиметров из корпуса. В первом случае для обеспечения акустического контакта необходимо использовать контактную жидкость. Во втором случае можно обойтись без нее, что очень удобно при контроле объектов с необработанной поверхностью.

Значительно сократить время контроля можно, используя линейку или матрицу малоапертурных МСС, размещенных в одном корпусе [5]. Увеличение количества измерительных каналов не является сложной технической проблемой при современном уровне интеграции электронных устройств.

Электрический импеданс малоапертурных магнитострикционных сенсоров составляет 0,1...50,0 Ом. Изготовление пассивных согласующих устройств в одном корпусе с сенсором позволяет уменьшить потери сигнала при передаче его к электронным блокам. Особенно это эффективно для сенсоров с маловитковыми катушками.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что наилучшие параметры и характеристики преобразователей достигаются при использовании однослойных маловитковых катушек возбуждения. Для обеспечения высокой мощности излучения возбуждающих преобразователей и повышения чувствительности принимающих сенсоров используются многосекционные катушки, которые позволяют получить эффект акустического суммирования сигналов в волноводе.

Применение ультразвуковых концентраторов при проектировании малоапертурных сенсоров позволяет в несколько раз повысить эффективность последних.

Волновод преобразователей имеет акустический импеданс, близкий к импедансу контролируру-

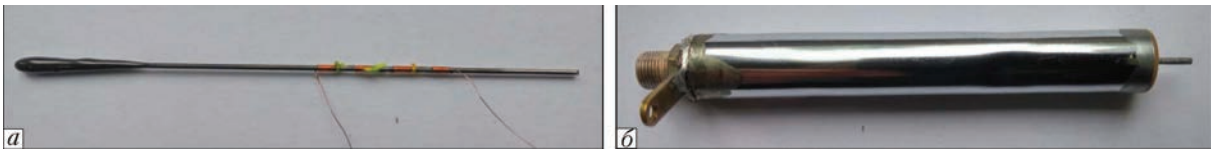


Рис. 5. Малоапертурные магнитострикционные сенсоры: а – волновод с катушкой и демпфером; б – внешний вид

емого объекта, что удобно для акустического согласования сенсора и объекта контроля.

Еще одно существенное преимущество МСС – точка Кюри (температура, при которой исчезает магнитострикционный эффект) для большинства распространённых магнитострикционных материалов находится в пределах 600...1200 °С, что значительно превышает температуру Кюри для пьезоэлектрических преобразователей. Эта особенность позволяет использовать малоапертурные МСС при высоких температурах, что необходимо для контроля нагретых тел (котлов, труб, теплообменников и так далее) непосредственно в процессе их функционирования.

Применение в системах ультразвукового контроля малоапертурных магнитострикционных сенсоров позволило также с высокой достоверностью контролировать распределение акустического давления по поверхности элементов ультразвуковых фазированных антенных решеток, а также другие параметры и характеристики современных ультразвуковых сенсоров.

#### Список литературы

1. Seung H. M., Kim Y. Y. (2016) Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer. *NDT & E International*, **80**, 6–14.
2. Kwun H., Teller C. M. (1994) Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod. *Journal of the Acoustical Society of America*, **96**, 1202–1204.
3. Бабак В. П., Богачев І. В. (2014) *Ультразвуковий малоапертурний магнітострикційний перетворювач*. Україна Пат. 104567, заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ.
4. Бабак В. П., Бабак С. В., Берегун В. С. та ін. (2015) *Інформаційне забезпечення моніторингу об'єктів теплоенергетики*. Бабак В. П. (ред.), Київ.
5. Бабак В. П., Богачев І. В. (2015) *Матриця малоапертурних магнітострикційних перетворювачів*. Україна, Пат. 107629; заявник і власник патенту ІТТФ НАНУ.

#### References

1. Seung, H.M., Kim, Y.Y. (2016) Generation of omni-directional shear-horizontal waves in a ferromagnetic plate by a magnetostrictive patch transducer. *NDT & E Intern.*, **80**, 6-14.
2. Kwun, H., Teller, C.M. (1994) Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional and flexural waves in a steel rod. *J. of the Acoustic Society of America*, **96**, 1202-1204.
3. Babak, V.P., Bogachev, I.V. (2014) *Ultraviolet small aperture magnetostrictive transducer*. Pat. 104567 Ukraine, ITTF NASU [in Ukrainian].
4. Babak, V.P., Babak, S.V., Beregun, V.S. et al. (2015) *Information support for monitoring of thermal energy facilities*. Ed. by Babak V.P. Kiev [in Ukrainian].
5. Babak, V.P., Bogachev, I.V. (2015) *Matrix of small aperture magnetostrictive transducers*. Pat. 107629, Ukraine. ITTF NASU [in Ukrainian].

І. В. БОГАЧЕВ, Л. В. МЕЛЕШЧЕНКО

Інститут технічної теплофізики НАН України, 03057, м. Київ-57, вул. Желябова, 2а. E-mail: biv\_vdoc@ukr.net

#### ПОКРАЩЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТОСТРИКЦІЙНИХ СЕНСОРІВ

Розглянуто різні конструкції ультразвукових перетворювачів, що використовують магнітострикційний ефект і мають малу площу випромінюючої поверхні (діаметр хвилеводу 0,3...1,0 мм), що дозволяє створити в контрольованому зразку напівсферичну (ненапрявлену) поздовжню хвилю при зондуєму радіоімпульсному сигналі. Наведено схему стенду, за допомогою якого можна визначити основні характеристики і параметри складових елементів магнітострикційних сенсоров. Проаналізовано вплив різних факторів і параметрів на чутливість і потужність випромінювання перетворювачів. Висока чутливість сенсоров досягається також за рахунок використання спеціальних матеріалів з високими значеннями коефіцієнта магнітострикції та магнітострикції насичення, які піддаються певній технологічній обробці. Розглянуто способи забезпечення акустичного контакту між сенсорами і об'єктами контролю. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: діаграма напрямленості, акустичний контакт, малоапертурні магнітострикційні сенсори

#### IMPROVEMENT OF MAIN PARAMETERS OF MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCERS

I. V. BOGACHEV, L. V. MELESHCHENKO

Institute of Engineering Thermophysics of the NASU, 2a Zhelaybova str., Kiev-57, 03057. E-mail: lektron2007@gmail.com

Considered are different designs of ultrasonic transducers, applying magnetostrictive effect and having small surface radiation area (waveguide diameter 0.3-1.0 mm) that allows developing a semispherical (omnidirectional) longitudinal wave in a controlled object at probing radio-pulse signal. A scheme of a bench, which can help to determine the main characteristics and parameters of constituent elements of the magnetostrictive transducers, is provided. Effect of different factors and parameters on sensitivity and transducer radiation power was analyzed. High transducer sensitivity is also reached due to application of special materials with high values of coefficient of magnetostriction and magnetostriction saturation, which are subjected to specific technological treatment. The methods providing acoustic contact between the transducers and test objects were considered. 5 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: directional diagram, acoustic contact, low-temperature magnetostrictive transducers.

Поступила в редакцію  
01.02.2017

## ЕКСПРЕС-МЕТОДИКА АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО РАНЖУВАННЯ ГАЛЬВАНОПОКРИТТІВ ЗА ЯКІСТЮ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, Р. Я. ЯРЕМА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: skalsky.v@gmail.com

<sup>2</sup>ПрАТ Львівський локомотиворемонтний завод

Запропоновано експрес-методику ранжування за якістю гальванопокриттів, які наносили на внутрішні кільця буксового підшипника локомотивів під час проведення відновлювально-реставраційних робіт. В основу методики покладено явище акустичної емісії, яке супроводжує мікророзтріскування та відшарування покриттів від поверхні кільця за статичного навантаження триточковим згином спеціально підготовлених призматичних зразків з гальванопокриттям. Діапазон навантажень обмежений пружною ділянкою діаграми розтягу матеріалу, яку отримували експериментально. Випробування зразків проводили у три цикли навантаження і на кожному фіксували пружні хвилі акустичної емісії, за сумою амплітуд яких судили про якість адгезії нанесених покриттів. Бібліогр. 6, табл. 4, рис. 5.

*Ключові слова:* гальванопокриття, водень, руйнування, акустична емісія, пошкодженість, адгезія

Одним із відповідальних вузлів ходової частини локомотивів (та й взагалі підвіски вагонів) є вузол буксового підшипника. Висока інтенсивність експлуатації залізничного транспорту та незадовільний стан колій призводить до передчасного зношування його кілець. Для ремонтно-реставраційних робіт з метою відновлення функціональних характеристик підшипників останнім часом ефективно використовують електролітичне осадження – гальваностегію. Наносять залізо-цинкові покриття, які відзначаються міцним зчепленням з металом основи, мінімальною пористістю і дрібнокристалічною структурою. Вони не відшаровуються під час різких поштовхів і ударів. Якість покриттів і швидкість гальваностегії зумовлені густиною електричного струму, складом і температурою електроліту. Покриття отримують шляхом розряду катіонів заліза та катіонів цинку, що надходять із залізо-цинкового електроліту та за рахунок розчинення залізного анода [1]. Такі покриття збільшують корозійну стійкість металу внутрішніх кілець буксового підшипника, що забезпечує покращення їх технічних характеристик.

Однак в електролізері піз час протікання електролізного процесу окрім осаджуваного металу виділяється і водень, що сприяє підвищенню крихкості покриття. Атоми водню, адсорбуючись на поверхні осаду (шару покриття), викликають деформацію кристалічної ґратки, зростання внутрішніх напружень і збільшення твердості. Проникнення водню в основний метал, як правило, суттєво погіршує фізико-механічні властивості останнього, а також сприяє його декогезії. Все це зумовило проблему підбору не тільки оптимальної (якісної) технології нанесення покриття, але й

допустимої його товщини, оскільки саме час перебування в електролізері зумовлює наявність і негативний вплив на покриття водневого чинника.

Міцність зчеплення гальванопокриттів залежить від ретельності механічної і хімічної підготовки поверхонь, складу електроліту та режиму електролізу. Важливою умовою міцності є початкові умови електролізу, які повинні сприяти можливості прояву сил міжатомної взаємодії між осадам, який нарощують, та основним металом (підложкою). Ці сили проявляються з достатньою повнотою у випадку, коли відмінність у міжатомних віддальях кристалічної ґратки основного металу і металу, яким його покривають, не перевищує 15 %. Поверхня основного металу повинна бути очищеною від молекул сторонніх речовин, які перешкоджають зближенню атомів основного металу і покриття.

На міцність зчеплення (адгезію) впливають також дефекти субмікроструктури перехідного шару. Має значення і близькість коефіцієнтів лінійного розширення – за великої різниці між ними покриття може розтріскуватися і навіть відшаруватися у випадку значних коливань температури під час експлуатації. Суттєвий вплив на міцність зчеплення мають і внутрішні напруження, що виникають в гальванопокриттях і провокують навіть без дії зовнішніх зусиль їх розтріскування, відшарування і лущення.

Мета досліджень – створити експрес-методику акустико-емісійного оцінювання якості адгезії залізо-цинкових покриттів різної товщини, нанесених на кільця буксового підшипника, і провести її верифікацію іншими відомими методами.

**Методика випробувань.** Для експериментальних досліджень було підготовлено 4 групи зразків, які вирізали з внутрішньої сторони:

I – непокритого гальванічним шаром кільця;

II – кільця з гальванопокрыттям товщиною  $h = 0,15$  мм, нанесеним за серійною заводською технологією [2, 3]. Вздовж поверхні покриття наявні технологічні канавки у вигляді концентричних кіл, рівномірно віддалених одне від одного за шириною кільця. Колір покриття темно-сірий (ближчий до чорного).

III – кільця з покриттям товщиною  $h = 0,35$  мм, нанесеним за новою технологією. Колір поверхні покриття як у попередньої групи зразків – темно-сірий. Поверхня не має наявних технологічних канавок.

IV – кільця з покриттям товщиною  $h = 0,35$  мм, нанесеним за іншою, ніж у групи III технологією, світло-сірого кольору, без технологічних канавок на поверхні.

Хімічний аналіз покриттів, проведений за допомогою аналізатора елементного складу серії Express, показав, що вони різні за цим показником (табл. 1).

Для порівняння наведемо хімічний склад сталі ШХ 15СГ-III (мас. %): (0,95...1,05) С; (0,17...0,37) Si; (0,20...0,40) Mn; (1,30...1,65) Cr;  $Ni \leq 0,30$ ;  $S \leq 0,020$ ;  $Cu \leq 0,25$ ;  $(Cu+Ni) \leq 0,50$ .

Підготовлені до експериментів призматичні зразки мали розмір  $5 \times 20 \times 86$  мм з деяким потоншенням у середній частині за рахунок кривини кільця радіусом  $R = 90$  мм. Для випробувань триточковим згином кінці зразків шириною 10 мм обробляли шліфуванням до зникнення кривини поверхні і цими місцями їх встановлювали на опори (рис. 1).

Дані експериментальних випробувань та розрахунок напружень під час згинання зразків триточковим згином приведені у табл. 2 та на рис. 2.

З аналізу експериментальних даних випливає, що найміцнішими і найеластичнішими виявилися зразки групи I, а серед зразків з покриттям най-

еластичніші (найменша жорсткість) зразки групи III. Найгірші показники міцності також у цієї групи зразків. Ці результати було надалі ураховано нами під час розроблення експрес-методики, про що йтиметься нижче.

Перед акустико-емісійними випробуваннями (АЕ-випробування) для притирання зразків під індентором навантажувальної установки і опорами (з метою зменшення фонових завад) застосовували ефект Кайзера [4]. Спочатку встановлювали зашунтований зразок у відповідний пристрій і створювали під індентором і на опорах напруження на 20...30 % вищі від розрахункових критичних, які очікували під час випробувань. Потім навантаження поступово знижували, не досягаючи нуля, щоб уникнути переміщень зразка, і після цього знову доводили його до попередньо досягнутого рівня. Якщо при цьому сигнали АЕ (САЕ) не реєстрували, то це означало, що шумові джерела (тертя в місцях контакту, шуми навантажувального пристрою тощо) відсутні. У випадку порушення ефекту Кайзера застосовували спеціальні притискачі, звукоізоляцію і демпфування для усунення цього фактору.

Для перевірки працездатності та налаштування чутливості каналів АЕ-апаратури, оцінки згасання САЕ і швидкості їх поширення, а також встановлення порогового рівня тощо застосовували джерело Гсу [4].

Кінцеві налаштування вимірювальної АЕ-системи SKOP-8M були такими: кількість вимірювальних каналів – 2; тривалість вибірки (мс) – 0,5; період дискретизації (мкс) – 0,25; фільтр низьких частот (кГц) – 700; фільтр високих частот (кГц) – 40; поріг дискретизації (%) – 27; рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача (мкВ) – 7.

Таблиця 1. Хімічний склад гальванопокрыттів, мас. %

Група зразків	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Cd
II	0,876	1,172	–	–	45,819	0,153	0,328	51,027	0,625
III	0,611	3,687	0,319	0,260	53,948	–	0,257	40,589	0,328
IV	0,893	1,336	0,145	–	26,559	0,139	0,338	69,712	0,829

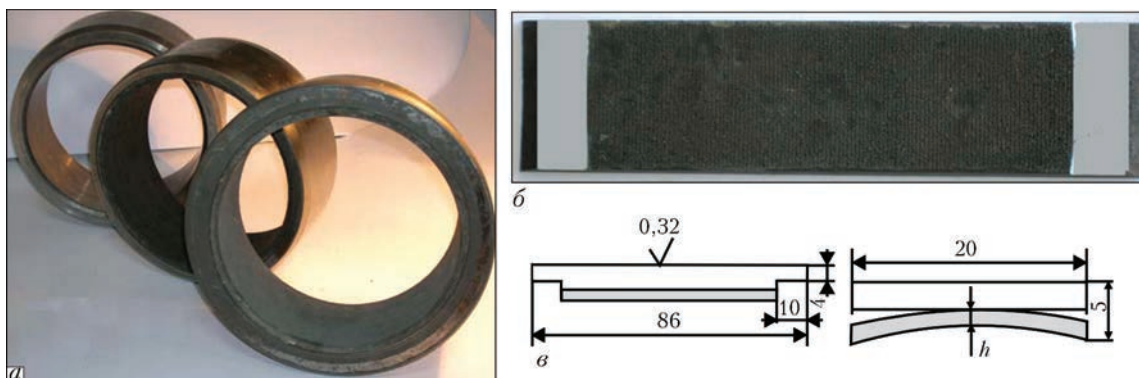


Рис. 1. Загальний вигляд внутрішніх кілець буксового підшипника з гальванопокрыттями (а), вирізаного типового зразка для експериментальних досліджень (б) та його характерні розміри (в)

Таблиця 2. Характеристики міцності зразків всіх груп, отримані за результатами механічних випробувань

Група зразків	Зусилля руйнування $P_k$ , Н	Максимальна стріла прогину зразків $f$ , мм	Напруження під час руйнування, $\sigma_k$ , МПа
I	7281,4	4,0	2088,359
II	6174,2	3,0	1788,743
III	4321,8	3,0	1488,274
IV	6399,4	3,2	1575,662

Навантажували зразки в області пружних деформацій, тобто до значень стріли прогину  $f = 2$  мм (див. рис. 2). Ураховуючи ефект Кайзера, таке навантаження кожного зразка проводили тричі. Для кожного типу зразків знаходили суму амплітуд САЕ, яка давала інформацію про об'ємну пошкодженість [5] кожного із них за ці 3 цикли навантаження. В експериментах розтягували всі зразки зі швидкістю переміщення рухомого затискача 1 мм/хв.

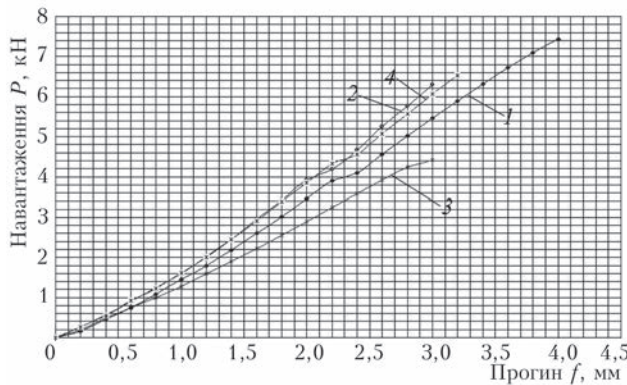
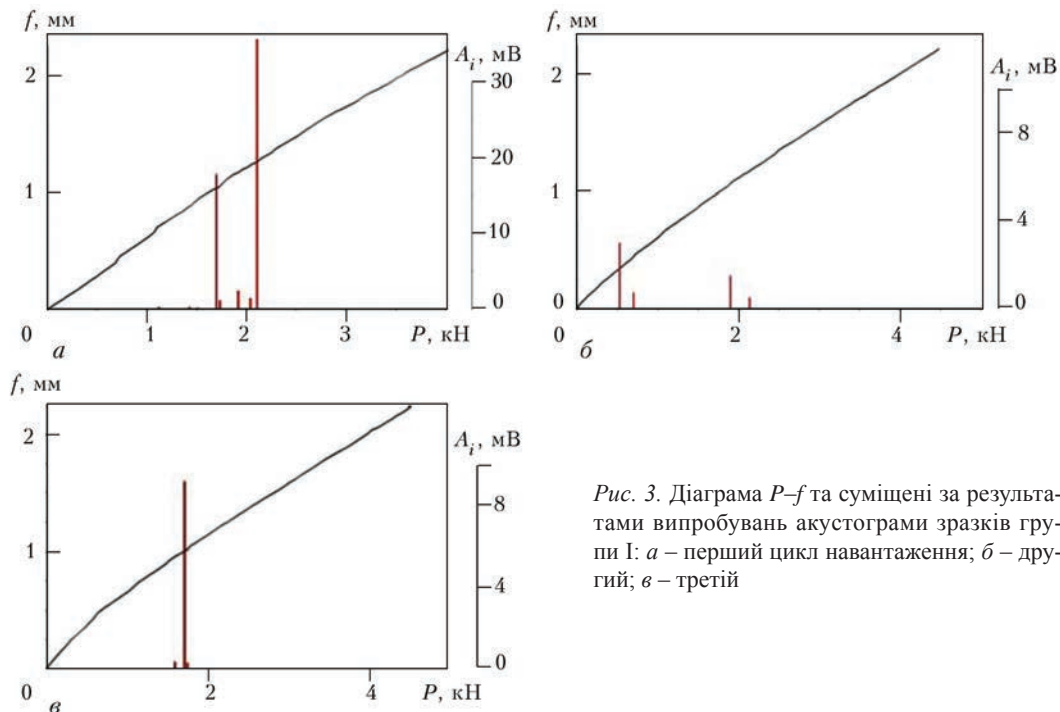


Рис. 2. Діаграми  $P-f$  для всіх груп зразків: позначені цифрами 1-4 криві належать групам зразків I-IV, відповідно



**Результати досліджень та їх інтерпретація.**

На рис. 3 та 4 показано характерні діаграми «навантаження  $P$ – стріла прогину  $f$ » для I та IV типу зразків, а у табл. 3 – кількісні показники об'ємної пошкодженості як критерія якості покриттів для всіх типів зразків.

Як показано на рис. 3, під час випроб I групи зразків найбільше сигналів АЕ генерується під час першого циклу навантаження і з'являються вони у цьому циклі після навантаження 1,1 кН. У другому циклі поява сигналів АЕ відбувається дещо раніше – приблизно за навантаження 0,6 кН, але з набагато меншими амплітудами, а у третьому циклі – після 1,6 кН з аналогічно, як і у другому циклі, низькими амплітудами. Отримана незначна сума амплітуд сигналів АЕ, що свідчить про низький рівень мікро- та макротріщиноутворення.

Зразки групи II вже у першому циклі навантаження проявляють у багато разів вищу АЕ – активність і амплітуди САЕ при цьому також приблизно у 3 рази перевищують максимальне значення аналогічного параметра у першому циклі навантаження зразків без покриття групи I. Це свідчить про високу активність тріщиноутворення і відшарування покриття вже у першому циклі навантаження і розпочинаються ці процеси на дуже ранніх його стадіях. З наближенням до значення стріли прогину 1 мм генерування АЕ наростає, а далі спадає і після досягнення 1,5 мм майже припиняється.

Що ж до характеру акустограм у 2 та 3 циклах навантаження цього типу зразків, то вони подібні зразкам I групи за стохастичністю появи та амплітудними параметрами. Це ще раз підкреслює прояв ефекта Кайзера у цих циклах навантаження.

Рис. 3. Діаграма  $P-f$  та суміщені за результатами випробувань акустограми зразків групи I: а – перший цикл навантаження; б – другий; в – третій



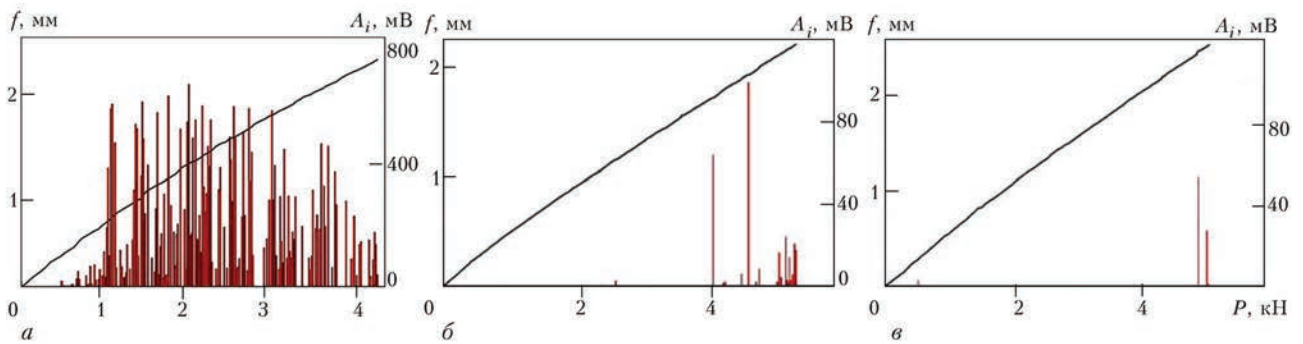


Рис. 4. Результати випробувань зразків групи IV (позначення аналогічні рис. 3)

Необхідно також звернути увагу на те, що контрольний показник стріли прогину  $f = 2$  мм досягається у даній групі зразків за нижчого значення навантаження в усіх трьох циклах, ніж у попередній групі зразків.

Аналіз акустограм III групи зразків показав вищу інтенсивність генерування САЕ, а також суттєво більші (приблизно у 2 рази) їхні амплітуди. Причому амплітуди сигналів САЕ та їх інтенсивність наростають у всьому циклі і першого, і наступних навантажень.

У другому циклі навантаження, наприклад, отримали також суттєве (у 20 разів) збільшення амплітуд САЕ та зростання їх кількості у даному циклі порівняно із попередньою групою зразків. А третій цикл навантаження дає вищі у 2 рази амплітуди САЕ та їхню кількість. Задана стріла прогину досягається приблизно за того ж навантаження, що й для II групи зразків.

Отже, процеси руйнування та відшарування покриття у III групі зразків набагато інтенсивніші і мають більші площі новоутворених поверхонь, ніж зразки групи II.

Зразки групи IV за описаними вище показниками мають ще більші значення (рис. 4). Тут амплітуди САЕ перевищують у першому циклі навантаження аналогічний показник для зразків групи III у 3...4 рази. Інтенсивність появи сигналів спадає після досягнення стріли прогину 1,5 мм. У другому циклі навантаження АЕ-показники цієї групи зразків аналогічні III групі, а у третьому циклі навантаження до стріли прогину 2 мм сигнали АЕ практично відсутні. Після збільшення навантаження у цьому циклі і доведення стріли прогину

до 2,5 мм здебільшого зразки руйнуються, чого не спостерігали для попередніх груп зразків (очевидно зріс прояв водневого чинника).

Початок генерування САЕ у першому циклі навантаження для зразків III та IV груп приблизно однаковий за стріли прогину 0,25 мм, однак зразки групи IV жорсткіші, оскільки досягнення заданої стріли прогину у них відбувається за вищого приблизно на 35...40 % навантаження.

Таким чином, результати АЕ-досліджень показали набагато гіршу якість покриття III та IV груп зразків по відношенню до зразків групи II, а їх всіх разом – по відношенню до зразків групи I, що свідчить про різну ефективність технологій нанесення покриттів, а відтак і про різний вплив водневого чинника. Це дає підстави стверджувати, що дана експрес-методика кількісного АЕ-оцінювання адгезії гальванопокриттів може бути ефективно застосована у виробничому процесі відновлення кілець буксового підшипника як експрес-методика ранжування за якістю готових виробів. Для цього проведемо її верифікування.

**Верифікація експрес-методики.** Для оцінки міцності зчеплення покриттів з основним металом застосовують якісні і кількісні методи. До перших належать методи полірування, крацювання, нанесення сітки подряпин, навивки, згину, нагрівання. До кількісних відносять методи відриву штирів, смужок, метод Олларда та інші [1].

Виходячи із поставленої мети, нами обрано два методи: якісної оцінки зразків II–IV груп методом нагрівання та кількісної – методом відриву штиря.

*Випробування гальванічних покриттів методом нагрівання.* Для оцінки міцності зчеплення

Т а б л и ц я 3. Характеристики об'ємної пошкоженості зразків під час їх випробувань деформацією пружного згину, встановленої за параметрами САЕ

Група зразків	Показник об'ємної пошкоженості $\xi_1$ (сума амплітуд сигналів АЕ), мВ			
	у циклах навантаження			сумарний
	1	2	3	
I	63	6,14	9,75	78,89
II	2680	4,61	11,25	2695,86
III	6178	290,5	311,3	6779,8
IV	47827	311,3	87,11	48225,41

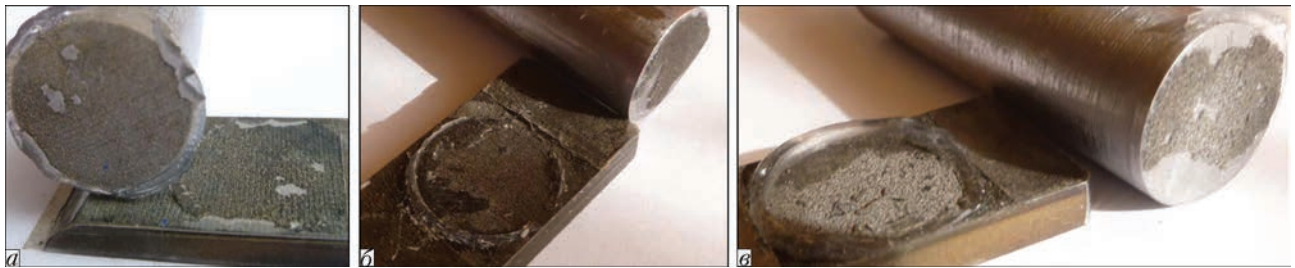


Рис. 5. Вигляд поверхонь відриву на штоках і зразках групи II (а), III (б) та IV (в)

гальванопокриття з основним металом зразки з покриттями нагрівали протягом 30...60 хв та охолоджували на повітрі згідно вимог методики. Після цього на поверхні деталі (зразка) не повинно спостерігатись пухиріння, відлущування чи відшарування покриття [1]. Температуру нагрівання вибирали залежно від типу металу, на який нанесли гальванічне покриття. Якщо основним металом слугує сталь або чавун, то рекомендується температуру нагрівання вибрати в межах 345...355 °С.

В якості автоклава слугувала електропіч СНОЛ-1-1,6. Зразки нагрівали разом із піччю від температури 180 °С. За досягнення зразками температури 350 °С їх витримували 30 хв, після чого витягували з автоклаву і охолоджували на повітрі. За досягнення кімнатної температури проводили візуальний огляд гальванопокриттів.

Як показали результати візуального огляду, жодне із гальванопокриттів не зазнало пухиріння. Проте поверхня покриття зразків групи IV стала дещо рапатішою, порівняно із вихідним станом, внаслідок незначного її вилущування.

Таким чином, за цим якісним показником можливо ранжувати покриття всіх трьох груп зразків дуже наближено.

*Кількісна оцінка зчеплення гальванічних покриттів з основним металом методом відриву штока.* В основу методу покладено вимірювання сили відриву покриття від основного металу. Для цього наклеювали шток до поверхні покриття і у відповідному пристрої відривали його за допомогою навантажувального механізму. Поверхню штока перед наклеюванням шліфували і підганяли за належним профілем до поверхні елемента з покриттям. Під час наклеювання і відривання забезпечували прикладання зусиль строго по нормалі до поверхонь склеювання. Напруження відриву (міцність зчеплення покриття з основою) розраховували за відомою формулою

$$\sigma = P/S \approx P/\pi r^2,$$

де  $P$  – зусилля відриву;  $S$  – площа контакту поверхні склеювання;  $r$  – радіус поверхні штока у місці склеювання.

Для склеювання штока з поверхнею покриття зразків було вибрано спеціальний клей

Таблиця 4. Характеристики відриву штоку від покриттів

Група зразків		
II	III	IV
$\sigma$ , МПа		
13,75...14,2	7,5...8,1	5,9...7,8

Loctite 3090 [6]. Він є двокомпонентною, швидкозосохлюючою і поропроникною клеючою речовиною, яка має відмінну адгезійну міцність (міцність приклеювання).

Зусилля плавно збільшували зі швидкістю навантаження 1 Н/хв і записували часову діаграму навантаження. За наведеною вище залежністю визначали напруження відриву  $\sigma$ . Дані розрахунків приведено у табл. 4.

Як показують результати досліджень (рис. 5), найкращі адгезивні властивості мають зразки групи II. На поверхнях відриву вони мають незначні острівкові залишки покриття, в той час як інші покриття відриваються майже по всій поверхні клеєвого шару.

Таким чином, у відповідності з різними хімічним складом та товщиною, покриття мають і різні характеристики міцності на відрив.

Отож результати верифікаційних досліджень ще раз підтвердили набагато гіршу якість покриттів III та IV груп зразків по відношенню до зразків групи II, а їх всіх разом – по відношенню до зразків групи I. Це збігається з результатами випробувань за АЕ експрес-методикою, що підтверджує її ефективність та високу достовірність.

#### Висновки.

Під час технологічного процесу нанесення гальванопокриттів на основний метал кільця буксового підшипника (підкладку) сталі ШХ-15 на якість покриття впливає багато чинників. Найголовнішим із них є водень, для виведення якого бажано проводити певні технологічні операції, наприклад нагрівання, з метою запобігання його негативного впливу.

За результатами випробувань зразків з різними технологіями нанесення та хімічним складом гальванопокриттів встановлено, що під час їх деформування в області пружних деформацій основного металу осаджене покриття руйнується

та відшаровується. Ці процеси супроводжуються генеруванням пружних хвиль акустичної емісії, за якими можна оцінювати якість покриттів. Як критерій відбракування чи оптимізування технології їх нанесення можна ефективно використовувати показник об'ємної пошкодженості, який за решти ідентичних методологічних характеристик зводиться до визначення суми амплітуд сигналів акустичної емісії. Збільшення значення суми амплітуд інтегрально свідчить про погіршення якості композиції покриття-основний метал (підкладка).

Запропоновану експрес-методику акустико-емісійного ранжування покриттів за якістю їх нанесення можна ефективно використовувати у виробничому процесі реставрації кілець буксового підшипника.

1. Каданер Л. И. (1976) *Справочник по гальваностегии*. Киев, Техника.
2. Ярема Р. Я., Колесніков В. П., Роневич В. І., Дьомін Р. Ю. (2012) *Способ відновлювання внутрішніх кілець буксового підшипника*. Україна, Пат. 69432. МПК: F16C 33/68 (2006.01).
3. Ярема Р. Я., Колесніков В. П., Роневич В. І. (2012) *Установка для відновлювання внутрішніх кілець буксового підшипника*. Україна, Пат. 69433. МПК: F16C 33/68 (2006.01)
4. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. посібник: у 3-х т.* Київ, Наукова думка.
5. Скальський В. Р., Андрейків О. Є. (2006) *Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії*. Львів, ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка.
6. [http://loctite-rus.narod.ru/catalog/tsianokrilatnie\\_klei/loctite\\_3090](http://loctite-rus.narod.ru/catalog/tsianokrilatnie_klei/loctite_3090): *Loctite 3090 двухкомпонентный цианоакрилатный клей с высокой заполняющей способностью*.

#### References

1. Kadaner, L.I. (1976) *Reference book on galvanostegy*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
2. Yarema, R.Ya., Kolesnikov, V.P., Ronevych, V.I., Dyomin, R.Yu. (2012) *Method of reconditioning of inner rings of engine journal bearing*. Pat. 69432 Ukraine, Int. Cl. F16C 33/38 (2006.01) [in Ukrainian].
3. Yarema, R.Ya., Kolesnikov, V.P., Ronevych, V.I. (2012) *Unit for reconditioning of inner rings of engine journal bearing*. Pat. 69433 Ukraine, Int. Cl. F16C 33/68 (2006.01) [in Ukrainian].
4. Nazarchuk, Z.T., Skalsky, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structure elements: Scientific-technical refer. book*. In: 3 Vol., Kiev, Naukova Dumka [in Ukrainian].
5. Skalsky, V.R., Andrejkiv, O.E. (2006) *Assessment of volume damage of materials by acoustic emission method*. VTs LNU [in Ukrainian].
6. [http://loctite-rus.narod.ru/catalog/tsianokrilatnie\\_klei/loctite\\_3090](http://loctite-rus.narod.ru/catalog/tsianokrilatnie_klei/loctite_3090): *Loctite 3090 two-part cyanoacrylate adhesive with high filling capacity* [in Russian].

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, Р. Я. ЯРЕМА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5  
E-mail: skalsky.v@gmail.com

<sup>2</sup>ПрАТ Львовский локомотиворемонтный завод

#### ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО РАНЖИРОВАНИЯ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ ПО КАЧЕСТВУ

Предложена экспрес-методика ранжирования по качеству гальванических покрытий, которые наносили на внутренние кольца буксового подшипника локомотивов при проведении восстановительно-реставрационных работ. В основу методики положено явление акустической эмиссии, которое сопровождается микрорастрескиванием и отслоением покрытий от поверхности кольца при статической нагрузке трехточечным изгибом специально подготовленных призматических образцов с гальванопокрытием. Диапазон нагрузок ограничен упругим участком диаграммы растяжения материала, которую получали экспериментально. Испытания образцов проводили в три цикла нагрузки и на каждом фиксировали упругие волны акустической эмиссии, по сумме амплитуд которых судили о качестве адгезии наносимых покрытий. Библиогр. 6, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: гальванопокрытия, водород, разрушение, акустическая эмиссия, поврежденность, адгезия

#### EXPRESS-METHOD FOR ACOUSTIC-EMISSION RANKING OF ELECTRODEPOSITS ON QUALITY

V. R. SKALSKY<sup>1</sup>, R. YA. YAREMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> H. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5 Naukova str., Lviv, 79060.

E-mail: skalsky.v@gmail.com

<sup>2</sup> PJSC Lviv engine repair plant

An express-method for quality ranking of the electrodeposits was proposed. The latter were deposited on the inner rings of engine journal bearings during repair-restoration works. The method is based on acoustic emission phenomenon, which accompanies microcracking and delaminations of the coatings from ring surface at static three point bend loading of specially prepared columnar specimens with electrodeposits. A loading range is limited by elastic parts of material stress-strain diagram, which was experimentally received. Specimens were tested in three cycles of loading and elastic waves of acoustic emission were registered at each cycle. Adhesion of the deposited coatings was evaluated by sum of the amplitudes. 6 Ref., 4 Table., 5 Fig.

Keywords: electrodeposits, hydrogen, failure, acoustic emission, damage, adhesion

Надійшла до редакції  
18.09.2017

### 1-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО СВАРКЕ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ 2018 1st ICWNDT-2018

22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

Адрес: WGI: Trapezountos & Digeni Akrita, Elefsina 192 00, Attikis, Greece.

Phone (+30) 210 3630050, Fax (+30) 2103636917,

Website: www.wgi.gr, E-mail: tzaferis@wgi.gr

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ НАГРЕТОЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

В. А. ПОРЕВ, А. С. ТОМАШУК

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37.

E-mail: a.tomashuk-2018@kpi.ua

В процессе волочения наиболее важным фактором, который отвечает за качество изготавливаемой продукции, является температурный режим изделия в момент его деформации. При горячем волочении проволоки используют предварительный ее нагрев в печи плавления. Такой подход необходим для получения изделий из тех металлов и сплавов, которые не поддаются холодному волочению. Нынешние методы и устройства контроля качества таких изделий в процессе их изготовления не предусматривают одновременный контроль более одного параметра. Нами предложен метод контроля одновременно двух параметров нагретой проволоки – диаметра и температуры в зоне ее предварительного нагрева. В качестве инструмента было предложено использовать телевизионную информационно-измерительную систему на КМОП-матрице. Такой подход обусловлен широким пространственным разрешением и большими возможностями этих систем. Кратко рассмотрены работы авторов предшествующего уровня техники. В соответствии с предложенным методом и поставленными задачами было разработано программное обеспечение для проведения измерений в режиме реального времени, также был разработан и собран экспериментальный стенд. Представлены результаты эксперимента, сделаны выводы. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 2.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, телевизионные информационно-измерительные системы, волочение, проволока, температурное поле, диаметр, теневой метод

Телевизионные информационно-измерительные системы (ТИИС) на основе приборов с зарядовой связью и приборов, изготовленных по технологии комплементарной структуры металл-оксид полупроводник (матриц ПЗС и КМОП), широко используются в научных исследованиях и промышленности. Такие системы способны измерять энергетические, динамические и геометрические характеристики объектов.

Контроль двух параметров – температурной карты и линейных размеров, приводит к более детальной информации, поступающей от объекта, что делает, к примеру, технологический процесс изготовления изделий в режиме реального времени (РРВ) более устойчивым и предполагает меньшее количество брака.

Важно отметить тот факт, что при несоблюдении технологического процесса изделие может содержать внутренние дефекты, хотя проконтролированные линейные размеры были в зоне допуска [1].

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Известны работы, целью которых был одновременный контроль диаметра и температуры таких протяженных объектов, как проволока и труба [2, 3].

В основе измерений линейных размеров положен подсчет отдельных пиксел по заданному порогу яркости на профиле изображения по ширине кадра (измерительный контур). Такой метод, при котором за линейный размер объекта принимается сумма пиксел его изображенной тени, называется

ся теневым. Данный метод достаточно прост и не требует дополнительных операций с изображением, что значительно уменьшает время выполнения процесса измерения.

В вышеуказанных работах [2, 3] применялась предобработка изображения по методу Кэнни, и велся подсчет отдельных пиксел в бинарном изображении, на котором выделены контуры объекта.

В работе [3] условная температура определялась на основе яркости отдельных пиксел и сопоставлялась со значениями термодпары. При этом оптическая система (ОС) измерительного прибора имела в своей конструкции широкополосный светофильтр, пропускающий короткие длины волн инфракрасной области.

Следует заметить, что в большинстве работ, посвященных измерению поперечных сечений объектов, применяется предобработка изображения для выделения их контуров [4–6].

На данное время не существует метода контроля параметров протяженных изделий, при котором одновременно ведется контроль температурной карты и линейных размеров объекта с минимальной задержкой на выполнение алгоритма измерения в РРВ.

**Цель и задачи исследования.** Целью данного исследования являлось усовершенствование метода контроля параметров проволоки в процессе изготовления в режиме реального времени.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

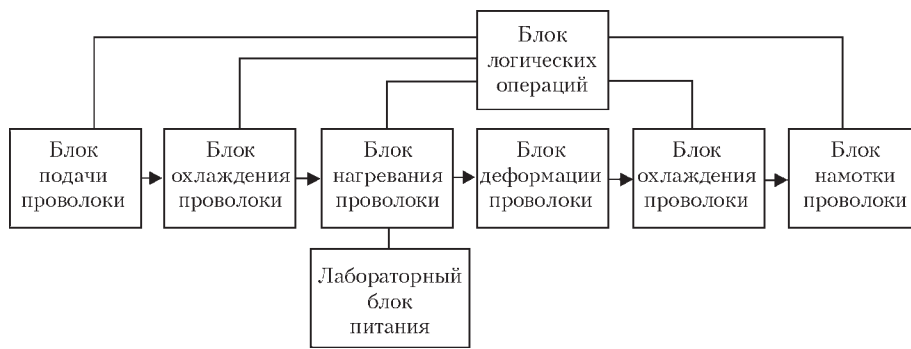


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

- разработка метода для одновременного изменения двух параметров объекта;
- разработка программного обеспечения;
- разработка экспериментального стенда и проведение исследований.

**Исследуемые материалы и оборудование, которое использовалось в эксперименте.** Нами разработан и собран стенд, в котором нагрев участка проволоки (NiCr) диаметром 2,5 мм осуществлялся электроконтактным способом с помощью лабораторного блока питания. На рис. 1 показана схема экспериментального стенда, а на рис. 2 – его общий вид.

Конструкция ТИИС включала следующие компоненты:

- объектив с оптической схемой типа «Планар»;
- узкополосный интерференционный светофильтр, выделяющий длину волны 622,8 нм;
- модуль камеры с КМОП-матрицей (максимальное разрешение матрицы составляет 1280×960 пиксел, однако в эксперименте для большей частоты измерений использовалось 640×480);
- систему охлаждения КМОП-матрицы на основе элемента Пельтье.

Для измерения действительной температуры проволоки использовался промышленный радиационный пирометр.

Разработанное программное обеспечение выводило на экран всю необходимую информацию: уровни сигналов, распределение яркости на измерительном контуре (профиле изображения), диаметр проволоки.

**Метод измерения диаметра и условной температуры.** Пирометрия объекта должна вестись исходя из возможностей ТИИС, и зависит она в большей степени от линейного участка светосигнальной характеристики приемника излучения [7, 8]. Как и в работе [9] для измерений мы использовали информацию только с красного канала.

Формула вероятности появления на изображении пиксела со значением яркости (гистограмма изображения) выражается [10]:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{MN}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1, \quad (1)$$

где  $MN$  – общее количество пикселей изображения;  $n_k$  – количество пикселей с яркостью  $r_k$ ;  $L$  – максимальное допустимое число градаций яркости (г. я.) на изображении (256 г. я. для 8-битового изображения).

На построенной гистограмме изображения имеется самый высокий пик, соответствующий освещению, испускаемому нагретым объектом, которое проявляется в фоновой части изображения. Однако такой пик имеет достаточно низкий уровень сигнала (выражается в г. я.), поэтому целесообразно использовать пороговое значение для исключения области, в которой он находится. И так как такой сигнал меньше полезного сигнала (на линейном участке светосигнальной характеристики приемника) и находится в участке низкочастотных шумов, пороговое значение будет лежать на их границе.

Сигнал  $A_{\text{hist max}}$ , характеризующийся высоким пиком на гистограмме изображения, и его близкие яркостные значения можно считать условной температурой объекта, которую в дальнейшем за законами яркостной пирометрии можно пересчитать в действительную температуру.

Яркость пиксела (области пикселей) выше фиксированного значения на изображении объекта может представлять собой завышенную температуру, для яркости пиксела ниже фиксированно-

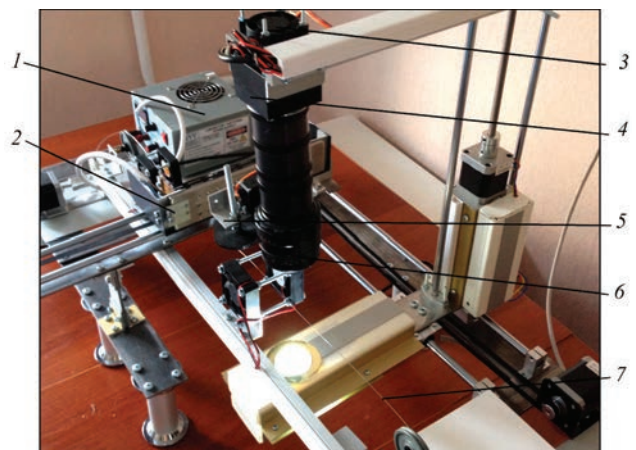


Рис. 2. Экспериментальный стенд: 1 – лабораторный блок питания; 2 – печь; 3 – система охлаждения КМОП-матрицы; 4 – корпус камеры; 5 – сервопривод для изменения диаметра зрачка диафрагмы; 6 – объектив; 7 – проволока

го значения – заниженную. Таким образом, можно определить распределение температуры по поверхности объекта (температурную карту).

Для измерения диаметра проволоки обычно используют только суммирование пикселей, которые отвечают изображению объекта. Фактически любое незначительное изменение яркости на граничном пикселе, который отвечает за кривую перехода изображения объекта в фон, может нарушить погрешность измерения на один физический размер пиксела (элемента матрицы). В том случае, если речь идет об элементах матрицы с малыми размерами (менее 4 мкм), то на практике можно получить результат погрешности, явно превышающий суммы нескольких физических размеров таких элементов.

В связи с этим нами было предложено использовать следующий метод, который уменьшает погрешность измерений диаметра при длительном наблюдении.

На выбранном измерительном контуре, взятом по центру ширины изображения, определялись наибольший и наименьший уровни присутствующих сигналов  $A_{\max}$  (объект) и  $A_{\min}$  (фон). Эти сигналы представляют соответствующие высокие пики на гистограмме изображения, которая построена для выбранного измерительного контура. Во всех случаях наименьший уровень сигнала  $A_{\min} = 0$ .

Порог уровня сигнала, на котором происходило измерение диаметра, определялся половиной значения  $A_{\max}$ .

Вместо традиционного суммирования пиксел, соответствующих изображению объекта, мы выходим за грани дискретности изображения и тем самым производим процесс измерения в участке, где уровень сигнала следующего пиксела выше заданного порогового значения. Формула, описывающая данный способ для предварительно отсортированных пиксел по значению яркости, выглядит следующим образом [11]:

$$D = \sum N(T) + \frac{(A_n - T)b}{A_n - A_{n-1}}, \quad (2)$$

где  $N(T)$  – пиксел со значением яркости, который не превышает соответствующий порог уровня сигнала  $T$ ;  $n$  и  $n-1$  – соседние пиксели по обе стороны от пересеченной пограничной кривой измерительной линией на соответствующем пороге

**Результаты эксперимента**

Данные эксперимента	$A_{\text{hist max}}$ , г. я.	$A_{\text{max}}$ , г. я.	$D$ , мм	$T$ , °C
$X_{\text{mid}}$	172	181	2,51	629,5
$X_{\text{max}}$	192	202	2,52	637
$X_{\text{min}}$	152	161	2,51	622
$\sigma$	6,84	7,68	0,01	2,3
$\Delta X$	40	41	0,01	15

уровня сигнала  $T$ , которые в свою очередь создают сторону  $b$  треугольника, равную константе 1;  $A_n$  и  $A_{n-1}$  – значения уровней сигналов конкретных пиксел.

В программной реализации выход за грани квантования изображения отдельных градаций яркости также произведен и для порогового значения.

Линейный размер со значений в пикселах переводился в метрическую систему, исходя из физического линейного размера пиксела и заранее прокалиброванного масштаба изображения.

**Описание хода эксперимента.** В ходе эксперимента при каждой итерации в соответствии с предложенным методом получали результаты диаметра, максимальных значений яркости, высокого пика на гистограмме изображения – яркости условной температуры. Интервал между итерациями был задан в 20 мс. С интервалом в 250 итераций записывался результат измеренной температуры проволоки, снятый радиационным пирометром.

Время эксперимента составляло 30 мин.

Результатами стали рассчитанные среднее значение  $X_{\text{mid}}$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma$  и разница  $\Delta X$  между наибольшим  $X_{\text{max}}$  и наименьшим  $X_{\text{min}}$  измеренными значениями.

**Результаты эксперимента.** Действительный интервал между итерациями был больше за счет выполнения программных алгоритмов, и по нашим подсчетам, исходя из данных эксперимента, составил  $t_{\text{итерации}} \approx 31,5$  мс. Остальные данные проведенного эксперимента: время эксперимента  $t$ , мин – 31; количество итераций  $i$  – 59117.

Результаты эксперимента приведены в таблице.

Действительная температура нагретой проволоки при статической нагрузке лабораторного блока питания была изменчива во времени. Разница температур за время эксперимента была 15 °C, что также отразилось и на значениях  $A_{\text{max}}$  и  $A_{\text{hist max}}$ , разница которых ограничивалась 40 г. я. Среднеквадратическое отклонение в случае  $A_{\text{hist max}}$  явно меньше по сравнению с  $A_{\text{max}}$ , что говорит об устойчивом распределении значений измеренной температуры.

Разница наибольшего и наименьшего значений измеренного диаметра составила  $\Delta X = 0,01$  мм.

**Выводы**

Усовершенствован метод контроля параметров проволоки в процессе волочения в режиме реального времени.

Результаты лабораторного эксперимента показали пригодность предложенного метода для одновременного измерения диаметра и температуры нагретой проволоки и, следовательно, данный метод может быть использован для контроля проволоки в процессе волочения.

## Список литературы

1. Перлин И. Л., Ерманок М. З. (1971) *Теория волочения*. Москва, Металлургия.
2. He Y., Liu X. et al. (2012) Rectifying control of wire diameter during dieless drawing by a deformation measuring method of interframe displacement *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19 (7), 615–621.
3. Supriadi S., Furushima T., Manabe K. (2012) Real-time process control system of dieless tube drawing with an image processing approach. *Materials Transactions*, 53 (5), 862–869.
4. Kumar D. K., Aliahmad B. et al. (2013) A method for visualization of fine retinal vascular pulsation using nonmydriatic fundus camera synchronized with electrocardiogram. *ISRN Ophthalmology*, 2013, 1–9.
5. Ziabari M., Mottaghitalab V. et al. (2007) A new image analysis based method for measuring electrospun nanofiber diameter *Nanoscale Res Lett. Nano perspectives*, 2 (12), 597–600.
6. Oznergiz E., Kiyak Y. E. et al. (2014) Automated nanofiber diameter measurement in SEM images using a robust image analysis method. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 1–6.
7. Порев В. А. (2015) *Телевізійні інформаційно-вимірвальні системи*. Київ, НТУУ «КПІ».
8. Шреддер Г., Трайнер Х. (2006) *Техническая оптика*. Москва, Техносфера.
9. Славков В. М., Давиденко О. П. (2015) Тепловий неруйнівний контроль та спосіб формування теплових полів на металевих пластинах. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 39–45.
10. Гонсалес Р. С., Вудс Р. С. (2012) *Цифровая обработка изображений*: изд. 3-е. Москва, Техносфера.
11. Томашук О. С., Федоренко А. В. та ін. (2017) Вдосконалення методики вимірювання та контролю дроту системами технічного зору. *Всеукраїнська наукова Інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення»*, вип 20. Тернопіль, Тайп, 95–98.

## References

1. Perlin, I.L., Ermanyuk, M.Z. (1971) *Drawing theory*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Hew, Y., Liu, X. et al. (2012) Rectifying control of wire diameter during dieless drawing by a deformation measuring method of interframe displacement. *Int. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(7), 615–621.
3. Supriadi, S., Furushima, T., Manabe, K. (2012) Real-time process control system of dieless tube drawing with an image processing approach. *Mater. Transact.*, 53(5), 862–869.
4. Kumar, D.K., Aliaahmad, B. et al. (2013) A method for visualization of fine retinal vascular pulsation using nonmydriatic fundus camera synchronized with electrocardiogram. *ISRN Ophthalmology*, 2013, 1–9.
5. Ziabari, M., Mottaghitalab, V. et al. (2007) A new image analysis based method for measuring electrospun nanofiber diameter. *Nanoscale Res. Lett.* 2(12), 597–600.
6. Oznergiz, E., Kiyak, Y.E. et al. (2014) Automated nanofiber diameter measurement in SEM images using a robust image analysis method. *J. of Nanomaterials*, 2014, 1–6.
7. Porev, V.A. (2015) *Television information and measuring systems*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
8. Shredder, G., Trainer, H. (2006) *Optical engineering*. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
9. Slaykov, V.M., Davidenko, O.P. (2015) Thermal non-destructive testing and method of formation of thermal fields on metal plates. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 39–45 [in Russian].
10. Gonzalez, R.S., Woods, R.S. (2012) *Digital image processing*. 3rd ed. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].
11. Tomashuk, O.S., Fedorenko, A.V. et al. (2017) Improvement of method for measurement and control of wire by machine vision systems. *In: All-Ukrainian Internet-Conf. on Information Society: Technological, economical and technical aspects of formation*, 20, Ternopil, Tajp, 95–98.

В. А. ПОРЕВ, А. С. ТОМАШУК

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ-56, пр-т Перемоги, 37. E-mail: a.tomashuk-2018@kpi.ua

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ НАГРІТОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСІ ВОЛОЧІННЯ

В процесі волочіння найбільш важливим фактором, який відповідає за якість продукції, що виготовляється, є температурний режим виробу в момент його деформації. При гарячому волочінні дроту використовують попереднє його нагрівання в печі плавлення. Такий підхід необхідний для отримання виробів з тих металів і сплавів, які не піддаються холодному волочінню. Нинішні методи і пристрої контролю якості таких виробів в процесі їх виготовлення не передбачають одночасний контроль більше одного параметра. Нами запропонований метод контролю одночасно двох параметрів нагрітого дроту – діаметра і температури в зоні його попереднього нагрівання. Як інструмент було запропоновано використовувати телевізійну інформаційно-вимірвальну систему на КМОП-матриці. Такий підхід обумовлений широкою просторовою здатністю та багатьма можливостями цих систем. Коротко розглянуті роботи авторів попереднього рівня техніки. Відповідно до запропонованого методу і поставлених завдань, було розроблено програмне забезпечення для проведення вимірювань в режимі реального часу, також був розроблений і зібраний експериментальний стенд. Представлено результати експерименту, зроблено висновки. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: неруйнівний контроль, телевізійні інформаційно-вимірвальні системи, волочіння, дріт, температурне поле, діаметр, тіньовий метод

## CONTROL OF PARAMETERS OF HEATED WIRE IN PROCESS OF DRAWING

V. A. POREV, A. S. TOMASHUK

NTUU "Igor Sikorsky KPI". 37 Pobedy ave., Kiev-56, 03056. E-mail: a.tomashuk-2018@kpi.ua

The most important factor for drawing process, which is responsible for quality of manufactured products, is a temperature mode in the moment of its deformation. The wire is pre-heated in a melt furnace during hot drawing. Such an approach is necessary for manufacturing the products of the metals and alloys, which can not be subjected to cold drawing. Current methods and quality control devices for such products do not provide control of more than one parameter in process of their manufacture. Our control method allows controlling simultaneously two parameters of the heated wire, namely diameter and temperature in zone of its pre-heating. TV information-measurement system based on CMOS-matrix was proposed as an instrument. Such an approach is caused by wide spatial resolution and large possibilities of these systems. Prior art works of different authors were considered in short. Software for real-time measurements as well as experimental bench were developed and assembled in accordance with the proposed method and stated problems. The results were presented and the conclusions were made. 11 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: non-destructive testing, TV information-measurement systems, drawing, wire, temperature field, diameter, shadow method

Поступила в редакцію  
06.10.2016

## ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ НАТУРНИХ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ВСІХ РІВНІВ З ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ

**В. Ю. ГЛУХОВСЬКИЙ, Б. О. ОНАЩЕНКО**

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України 03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Навчання та атестація фахівців всіх рівнів з теплового методу контролю згідно вимог стандарту EN ISO 9712:2012 потребують роботи з екзаменаційними зразками з метою напрацювання процедур тепловізійного контролю та набуття навичок розшифрування отриманих термограм. Розглянуто особливості створення екзаменаційних зразків, що можуть застосовуватись не лише для атестації фахівців всіх рівнів, а й для проведення практичних занять під час навчання. Розглянуто і джерела тепла, які дозволяють моделювати різні умови експлуатації об'єктів контролю. Визначено конкретний тип об'єктів, які при заданих умовах експлуатації не можуть адекватно контролюватись із застосуванням промислових тепловізорів. Це викликано малим значенням різниці температур над дефектом, яке значно менше ніж температурна похибка вимірювального тепловізійного обладнання. Бібліогр. 3, рис. 9.

*Ключові слова:* тепловий контроль, джерело нагріву, екзаменаційний зразок, об'єкт контролю, термограма

В процесі роботи над підготовкою фахівців I, II або III рівня з теплового методу контролю згідно вимог стандарту EN ISO 9712:2012 виникає проблема створення деяких типів навчальних та екзаменаційних зразків для проведення практичних занять та подальшої атестації.

Особливістю теплового контролю є необхідність у застосуванні джерела нагріву, яке створює в процесі своєї роботи надлишкове температурне поле на поверхні контрольованого об'єкту, що відрізняється від температури навколишнього середовища [1, 2]. При цьому, температурне поле над дефектом повинно мати значення, відмінне від значення температури над бездефектною зоною, і становити величину більшу, ніж похибка вимірювального приладу. В іншому випадку дефект не проявиться на термограмі і буде мати значення бездефектної зони.

Так, при використанні пластини з дефектами, що імітують корозійно-ерозійне ураження стінки, достатньо в якості джерела нагріву використовувати інфрачервоні випромінювачі або джерела гарячого повітря (рис. 1).

При цьому, контрастність температурного поля над дефектом дозволяє проводити не лише кількісний аналіз, а й визначати геометричні параметри виявленого дефекту, використовуючи математичні методи (рис. 2). Матеріалом пластини може слугувати як метал, так і полімери, наприклад поліпропілен. В останньому випадку під дефектом розуміють зменшення товщини стінки.

Зразок з імітацією розшарування контролюється із застосуванням, як і в попередньому випадку, радіаційних та конвективних джерел нагріву (рис. 3).

Як видно з рис. 3, б, температурне поле над дефектом, як і в попередньому випадку, дозволяє визначати не лише кількісні, а й якісні характеристики виявленого дефекту із застосуванням математичних методів розрахунку теплових процесів, що виникають в зразку при нагріванні. Зразок виготовлено з низько вуглецевої сталеві пластины.

Контролюючи якість паяних з'єднань на прикладі паяних з'єднань статорних обмоток електродвигунів, достатньо пропустити постійний електричний струм, величина якого відповідає робочому значен-

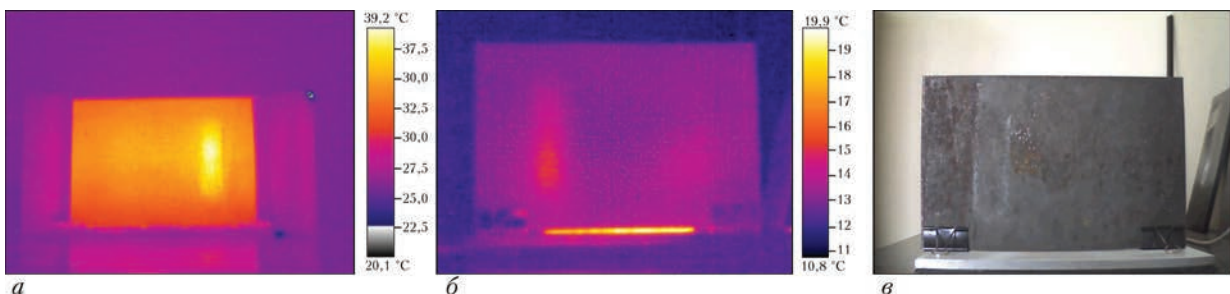


Рис. 1. Термограми: нагрівання інфрачервоним випромінюванням (а), потоком гарячого повітря (б) та видиме зображення пластини з дефектами, що імітує корозійно-ерозійне спрацьовування (в)

© В. Ю. Глуховський, Б. О. Онащенко, 2017



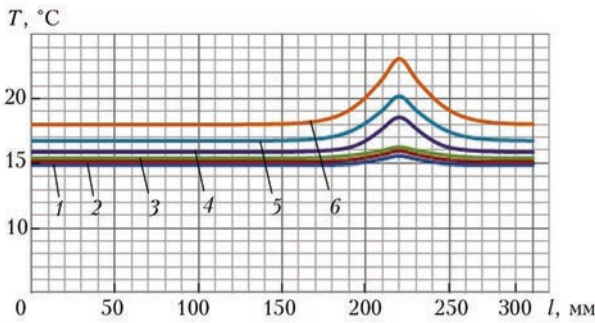


Рис. 2. Розподілення температури над дефектом в залежності від його координат та часу нагрівання зразка: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 60 с

ню і в даному випадку становить 500 А (рис. 4). При цьому контрастність температурного поля над паяним з'єднанням дозволяє проводити якісний та кількісний аналіз отриманих термограм [3]. А засто-

сування математичних методів дозволяє визначати величину непропаю як основного дефекту (рис. 5).

В якості контрольних зразків можуть виступати й термограми електричного обладнання, де поруч з дефектним вузлом чи приладом представлені бездефектні, при умові, що вони працюють в однакових умовах (рис. 6).

В якості джерела нагріву виступає електричний струм, що тече мережею. Протікаючи через дефектні ділянки відбувається їх нагрів та формується відповідне надлишкове температурне поле. Порівняльний аналіз термограм дозволяє визначати переважно кількісні параметри.

Будівлі та споруди в період опалювального сезону можуть також виступати контрольними та екзаменаційними зразками при підготовці фахівців. В даному випадку джерелом нагріву слугують конвективні потоки теплого повітря, що форму-

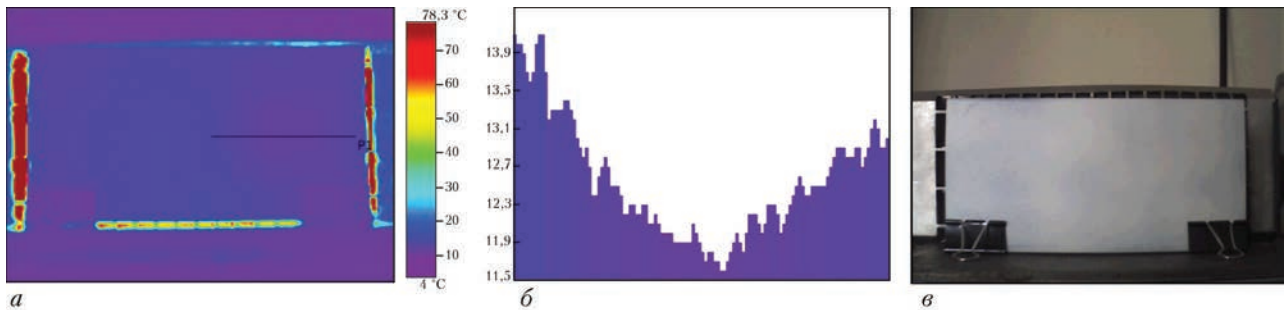


Рис. 3. Термограма (а), температурний профіль над дефектом (б) та видиме зображення пластини з дефектом, що імітує розшарування (в)

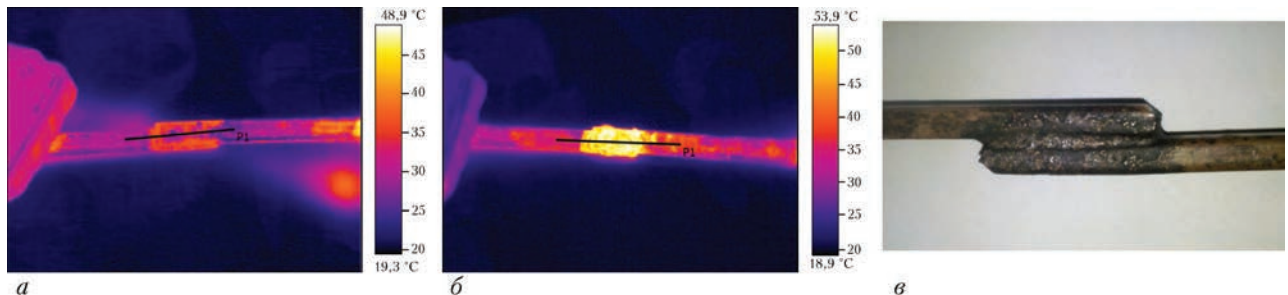


Рис. 4. Термограми бездефектного (а), дефектного (б) паяного з'єднання статорних обмоток електродвигуна та його видиме зображення (в)

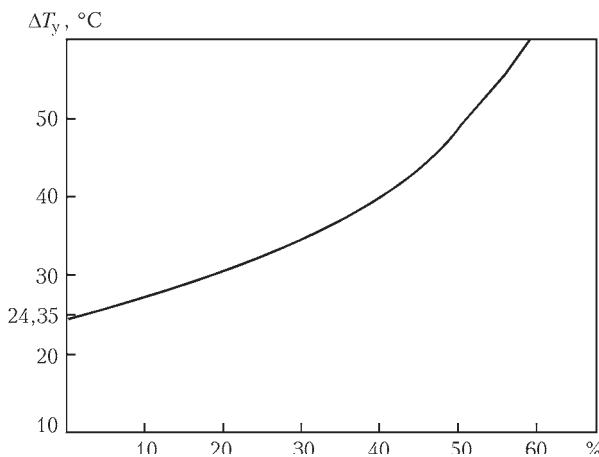


Рис. 5. Залежність граничного значення температур  $\Delta T_y$  в зоні припою від відсоткової складової площі пустот в паяному з'єднанні при струмі 500 А

ються радіаторами системи опалення в середині приміщень (рис. 7). При цьому, для коректної оцінки температурного поля огорожувальної конструкції температура в середині приміщення повинна бути вищою за температуру назовні щонайменше на 12°. За таких умов при аналізі температурного поля можна визначати не лише кількісні характеристики, а також якісні, застосовуючи математичні методи.

При створенні зразка, що імітує трубопровід гарячої води, виникає ряд питань щодо виявлення дефектних ділянок на термограмі. Під дефектами в даному випадку слід розуміти корозійно-ерозійне ураження внутрішньої стінки труби. Так, при нагріванні води в середині зазначеного зразка дефект не проявляється (рис. 8, а).

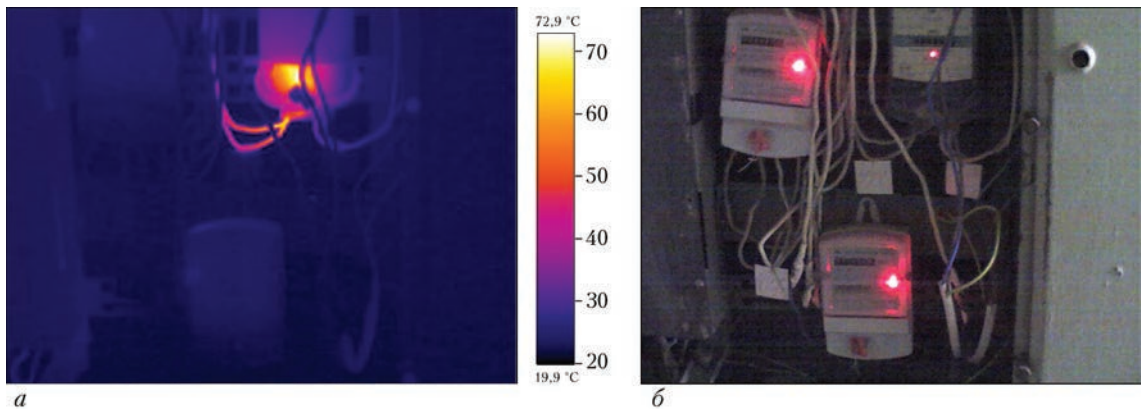


Рис. 6. Термограма (а) та видиме зображення (б) лічильників обліку спожитої електроенергії

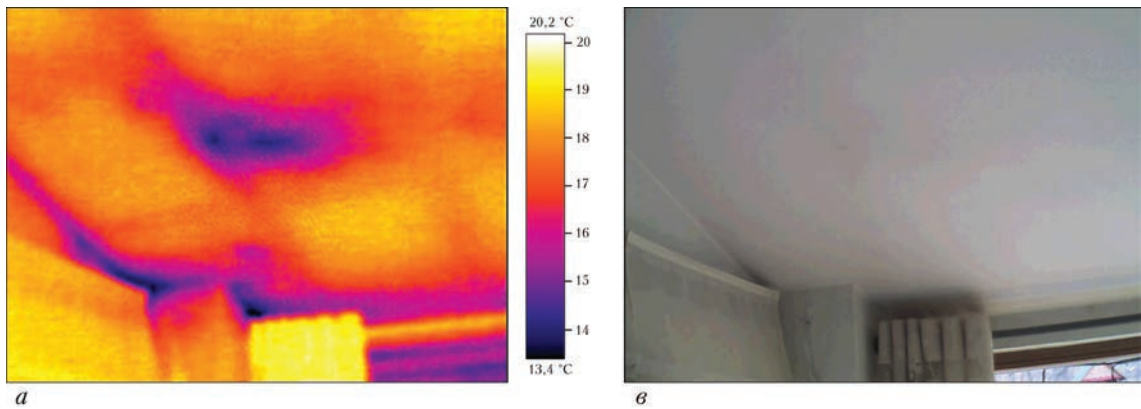


Рис. 7. Термограма (а) та видиме зображення (б) стелі одноповерхової вітальні приватного будинку



Рис. 8. Термограми при нагріванні води (а) та при нагрітій воді (б) в трубі з дефектом, а також її видиме зображення (в)

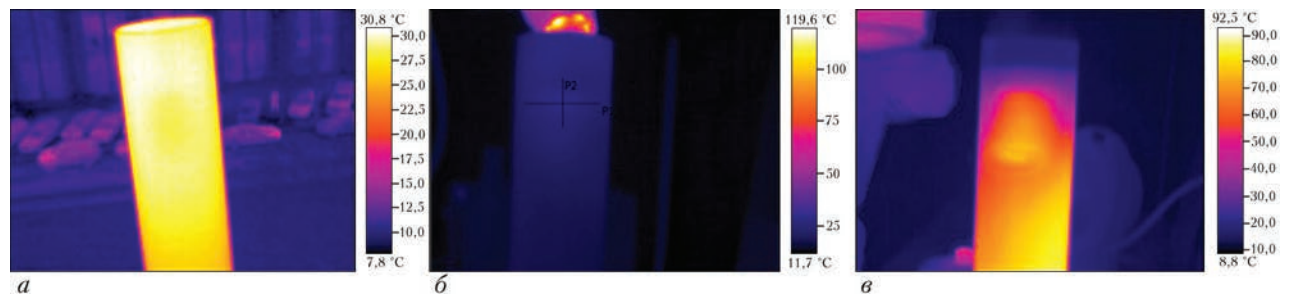


Рис. 9. Термограми труби з дефектом при охолодженні на повітрі (а), при нагріванні гарячим повітрям (б), при взаємодії з гарячою парою (в)

Така сама картина спостерігається при заповненні зразка вже нагрітою водою (рис. 8, б). Розрахунки теплових процесів, що відбуваються в системі вода-стінка труби-повітря, показують різницю температур над дефектам в межах 0,02 °С. Так, значення є значно меншим ніж похибка вимірювання в тепловізорах, що становить 0,1 °С. Дана похибка є актуальною для більшості

промислових тепловізійних камер, які застосовуються для технічної діагностики промислових та громадських об'єктів. Проте у випадку взаємодії гарячого повітря або нагрітої водяної пари з внутрішніми стінками труби на термограми починає проявлятися дефектна ділянка (рис. 9).

Таким чином, процес створення екзаменаційних зразків потребує не тільки натурних випро-

бувань, а й застосування математичних методів розрахунку теплових процесів в системах з метою визначення оптимальних параметрів нагріву контрольних зразків, прогнозування форми температурного профілю над дефектом та розробки ефективних процедур контролю.

#### Список літератури

1. Михеев М. А., Михеева И. М. (1977) *Основы теплопередачи*. Москва, Энергия.
2. Вавилов В. П. (2009) *Инфракрасная термография и тепловой контроль*. Москва, ИД Спектр.
3. Глуховский В. Ю. (2014) Применение тепловизионной диагностики для контроля качества паяных соединений статорных обмоток электродвигателей. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 23–27.

#### References

1. Mikheev, M.A., Mikheeva, I.M. (1977) *Fundamentals of heat transfer*. Moscow, Energiya [in Russian].
2. Vavilov, V.P. (2009) *Infrared thermography and heat control*. Moscow, ID Spektr [in Russian].
3. Glukhovskiy, V.Yu. (2014) Application of thermal imaging diagnostics to monitor the quality of soldered joints of electric motor stator windings. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 23-27 [in Russian].

В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ, Б. А. ОНАЩЕНКО

ІЭС ім. Е. О. Патона НАН України 03150, г. Київ-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

#### ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ВСЕХ УРОВНЕЙ ПО ТЕПЛОВОМУ КОНТРОЛЮ

Обучение и аттестация специалистов всех уровней по тепловому методу контроля согласно требованиям стандарта EN ISO 9712:2012 подразумевает работу с экзаменационными образцами с целью отработки процедур тепловизионного контроля и приобретения навыков расшифровки полученных термограмм. Рассмотрены особенности создания экзаменационных образцов, которые могут применяться не только для аттестации специалистов всех уровней, но и для проведения

практических занятий в процессе их обучения. Рассмотрены источники тепла, позволяющие моделировать различные условия эксплуатации объектов контроля. Определен конкретный тип объектов, которые при заданных условиях эксплуатации не могут адекватно контролироваться с применением промышленных тепловизоров. Это вызвано малой разностью температур над дефектом, которая значительно ниже, температурной погрешности измеряющей тепловизионной аппаратуры. Библиогр. 3, рис. 9.

Ключевые слова: тепловой контроль, источник нагрева, экзаменационный образец, объект контроля, термограмма

#### FEATURES OF PREPARATION OF FULL-SCALE SAMPLES FOR TRAINING THE SPECIALISTS ON HEAT MONITORING OF ALL LEVELS

V. Yu. GLUHOVSKII, B.O. ONASHCHENKO

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, 11 Kazimir Malevich Str., Kiev, 03680  
E-mail: office@paton.kiev.ua

Training and certification of the specialists on heat monitoring of all levels according to the requirements of EN ISO 9712:2012 standard stipulate work with examination samples for performance of the heat monitoring procedures and getting skills for decoding of received thermograms. The peculiarities of preparation of the examination samples that can be used for certification of the specialists of all levels as well as for holding the practical classes during training were considered. Heat sources allowing modelling different conditions of control objects operation were examined. A specific type of the objects, which at set operation conditions can not be adequately operated using industrial thermal imagers, was determined. It is caused by small temperature difference over defect, which is significantly less than the temperature error of measurement heat monitoring equipment. 3 Ref., 9 Fig.

Keywords: heat monitoring, heat source, examination sample, monitoring object, thermogram

Надійшла до редакції  
15.11.2017

### Украина и Китай усиливают сотрудничество в проектах возобновляемой энергетики

Вопросы сотрудничества в проектах возобновляемой энергетики обсуждались на пленарном заседании украинско-китайской подкомиссии по торгово-экономическому сотрудничеству в Министерстве коммерции КНР 17 ноября в Пекине.

Украинскую делегацию представила заместитель министра экономического развития и торговли Украины Наталья Никольская совместно с представителями Минагрополитики, МИД, Минэкономразвития, Мининфраструктуры, Госэнергоэффективности, Государственного инновационного финансово-кредитного учреждения, посольства Украины в Китае.

В ходе переговоров председатель Госэнергоэффективности Сергей Савчук охарактеризовал перспективные пути двустороннего сотрудничества в «чистой» энергетике:

- ▶ реализация совместных инвестиционных проектов,
- ▶ строительство заводов по производству оборудования и материалов для объектов возобновляемой энергетики,
- ▶ создание механизмов финансирования проектов «чистой» энергетики.

Китай — мировой лидер в наращивании мощностей возобновляемой энергетики. Это, в свою очередь, сказывается на глобальных тенденциях развития «чистой» энергетики. Так, по данным Международного энергетического агентства, с 2010 г. стоимость производства солнечной и ветровой энергии снизилась, соответственно, на 70 и 25 %. Это ускорило строительство солнечных и ветровых станций в других странах, в том числе в Украине.



# ВНЕДРЕНИЕ ГАРМОНИЗИРОВАННЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ И ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ В УКРАИНЕ

Н. А. ПРОЦЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью приведения национальной системы стандартизации к европейским и международным стандартам разработан и принят Закон Украины от 05.06.2014 № 1315-VII «О стандартизации» (далее Закон, вступивший в силу 03.01.2015), который предусматривает совершенствование правовых и организационных основ национальной стандартизации.

Согласно Программы деятельности Кабинета Министров Украины, утвержденной Постановлением Кабинета Министров Украины от 09.12.2014 № 695 и одобренной Постановлением Верховной Рады Украины от 11.12.2014 № 26-VIII было принято решение об отмене межгосударственных стандартов (ГОСТ), разработанных до 1992 г. Соответствующая информация 27.03.2017 была размещена на веб-сайте Государственного предприятия ГП «УкрНДНЦ», который выполняет функции Национального органа стандартизации. Для выполнения Программы ГП «УкрНДНЦ» на протяжении 2015 г. отменило все действующие в Украине ГОСТы (со сроками отмены в 2016, 2017, 2018 и 2019 гг.). Соответствующая информация размещена на веб-сайте ГП «УкрНДНЦ». Срок действия ГОСТов, касающихся сварочного производства, заканчивается 01.01.2018.

Законом Украины от 05.06.2014 № 1315-VII «Про стандартизацію», который действует с 03.01.2015 г., в национальное законодательство Украины как государства — члена Всемирной организации торговли (ВТО), реализованы положения Соглашения ВТО о технических барьерах в торговле, а именно Кодекса добровольной практики по разработке, принятию и

использованию стандартов, введению международных и европейских принципов стандартизации.

Прежде всего это касается принципа добровольного применения национальных стандартов, который изложен в статье 4 и статье 23 Закона, где указано, что национальные стандарты применяются на добровольной основе.

В соответствии со статьей 15 Хозяйственного кодекса Украины применение стандартов является обязательным:

- если это установлено нормативно-правовыми актами;
- для участников контракта по разработке, изготовлению или поставке продукции, если в нем есть ссылка на определенные стандарты;
- для производителя или поставщика продукции, если он оформил декларацию о соответствии продукции определенным стандартам или применил обозначение этих стандартов в ее маркировке.

Многие предприятия Украины, имеющие сварочные производства и выполняющие заказы для внешних рынков, используют международные и европейские стандарты на языке оригинала или стандарты, гармонизированные в Украине.

Сейчас в Украине введено в действие более 400 стандартов, касающихся сварочного производства, которые могут в полной мере заменить отмененные ГОСТы. В таблице приведен перечень гармонизированных стандартов по неразрушающему контролю.

*С актуальным состоянием нормативной документации можно ознакомиться на сайте УкрНДНЦ в разделах «Магазин стандартов» и «Каталог нормативной документации».*

## Перелік гармонізованих стандартів на неруйнівний контроль\*

Номер стандарту	Назва стандарту
ДСТУ ISO 17637-2003 (ISO 17637:2003, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням
ДСТУ ISO 17635:2015 (ISO 17635:2010, IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Загальні правила для металевих матеріалів
ДСТУ EN ISO 17636-1:2014 (EN ISO 17636-1:2013; IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 1. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням плівки
ДСТУ EN ISO 17636-2:2014 (EN ISO 17636-2:2013; IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 2. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням цифрових детекторів
ДСТУ EN ISO 10675-1:2014 (EN ISO 10675-1:2013; IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Сталь, нікель, титан та їх сплави
ДСТУ EN ISO 10675-2:2014 (EN ISO 10675-2:2013; IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Алюміній та його сплави
ДСТУ EN ISO 17640:2014 (EN ISO 17640:2010; IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Способи, рівні контролю і оцінювання

\* Гармонизированные стандарты в области сварки приведены в журнале «Автоматическая сварка» №11 за 2017 г., стр. 47–56

Номер стандарту	Назва стандарту
ДСТУ EN ISO 16827:2015 (EN ISO 16827:2014, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і розмірів несучільностей
ДСТУ EN ISO 11666:2014 (EN ISO 11666:2010;IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 13588:2014 (EN ISO 13588:2012;IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування автоматизованого методу фазованих решіток
ДСТУ EN ISO 23279:2014 (EN ISO 23279:2010;IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Характеристика індикацій у зварних швах
ДСТУ EN ISO 10863:2014	Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Ультразвукова дефектоскопія. Використання дифракційно-часового методу ((TOFD)
ДСТУ EN ISO 15626:2014 (EN ISO 15626:2013;IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Дифракційно-часовий метод (TOFD). Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 3452-1:2014 (EN ISO 3452-1:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи
ДСТУ EN ISO 3452-2:2014 (EN ISO 3452-2:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування дефектоскопічних матеріалів
ДСТУ EN ISO 3452-3:2014 (EN ISO 3452-3:2013, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 3. Контрольні випробувальні зразки
ДСТУ EN ISO 3452-4:2014 (EN ISO 3452-4:1998, IDT)	Неруйнівний контроль. Контроль капілярний. Частина 4. Устаткування
ДСТУ EN ISO 3452-5:2014 (EN ISO 3452-5:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 5. Капілярний контроль при температурах понад 50°C
ДСТУ EN ISO 3452-6:2014 (EN ISO 3452-6:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 6. Капілярний контроль при температурах нижче 10°C
ДСТУ EN ISO 23277:2014 (EN ISO 23277:2009;IDT)	Контроль неруйнівний зварних швів. Капілярний контроль. Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 17638:2014 (EN ISO 17638:2009;IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль
ДСТУ EN ISO 9934-1:2015 (EN ISO 9934-1:2015, IDT; ISO 9934-1:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги
ДСТУ EN ISO 9934-2:2015 (EN ISO 9934-2:2015, IDT; ISO 9934-2:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 2. Засоби контролю
ДСТУ EN ISO 9934-3:2015 (EN ISO 9934-3:2015, IDT; ISO 9934-3:2015, IDT)	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 3. Обладнання
ДСТУ EN ISO 23278:2014 (EN ISO 23278:2009;IDT)	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль зварних швів. Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 3059:2007 (EN ISO 3059:2001, IDT)	Неруйнівний контроль. Капілярний та магнітопорошковий контроль. Умови огляду
ДСТУ ISO 15549:2015 (ISO 15549:2008, IDT)	Неруйнівний контроль. Вихрострумний контроль. Загальні вимоги
ДСТУ EN 10308:2015	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль сталевих сортового прокату
ДСТУ EN 16407-1:2015	Неруйнівний контроль. Радіографічний контроль на наявність корозії та відкладень у трубах з використанням рентгенівського та гамма-випромінювання. Частина 1. Тангенціальний спосіб просвічування
ДСТУ EN 16407-2:2015	Неруйнівний контроль. Радіографічний контроль на наявність корозії та відкладень у трубах з використанням рентгенівського та гамма-випромінювання. Частина 2. Спосіб просвічування через дві стінки
ДСТУ EN ISO 10893-1:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 1. Автоматизований електромагнітний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для верифікації герметичності
ДСТУ EN ISO 10893-2:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 2. Автоматизований вихрострумний контроль сталевих безшовних і зварних труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення дефектів

Номер стандарту	Назва стандарту
ДСТУ EN ISO 10893-3:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 3. Автоматизований контроль методом розсіювання магнітного потоку по всій окружності безшовних і зварних труб з феромагнітної сталі для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
ДСТУ EN ISO 10893-4:2015 (EN ISO 10893-4:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 4. Капілярний контроль сталевих безшовних зварних труб для виявлення поверхневих дефектів
ДСТУ EN ISO 10893-5:2014	Неруйнівний контроль сталевих труб. Магнітопорошковий контроль безшовних і зварних сталевих труб для виявлення поверхневих несучільностей
ДСТУ EN ISO 10893-6:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 6. Радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів
ДСТУ EN ISO 10893-7:2015 (EN ISO 10893-7:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 7. Цифровий радіографічний контроль шва зварних сталевих труб для виявлення дефектів
ДСТУ EN ISO 10893-8:2015 (EN ISO 10893-8:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 8. Автоматизований ультразвуковий контроль сталевих безшовних і зварних труб для виявлення дефектів розшарування
ДСТУ EN ISO 10893-9:2015 (EN ISO 10893-9:2011, IDT)	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 9. Автоматизований ультразвуковий контроль для виявлення дефектів розшарування в смуговому/листовому металі, що використовується для виготовлення зварних сталевих труб
ДСТУ EN ISO 10893-10:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 10. Автоматизований ультразвуковий контроль по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, виконаних дуговим зварюванням під флюсом) для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
ДСТУ EN ISO 10893-11:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 11. Автоматизований ультразвуковий контроль шва зварних сталевих труб для виявлення поздовжніх і/або поперечних дефектів
ДСТУ EN ISO 10893-12:2015	Неруйнівний контроль сталевих труб. Частина 12. Автоматизований ультразвуковий контроль товщини по всій окружності безшовних і зварних сталевих труб (крім труб, отриманих дуговим зварюванням під флюсом)
ДСТУ EN ISO 16826:2015 (EN ISO 16826:2014, IDT)	Неруйнівний контроль. Ультразвукове вимірювання товщини



## VIII спеціалізована виставка

# МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

**ПС "Україна"**  
вул. Мельника, 18  
м. Львів

Інформаційні спонсори



Контакти

☎ тел./факс: (032) 244-18-88  
✉ e-mail: expolviv@gmail.com  
🌐 web: www.expolviv.ua





**25-27  
КВІТНЯ  
2018**

металорізальні верстати та оснастка

обладнання для обробки металу

ручний електроінструмент

ковальське обладнання

засоби захисту

металорізальні інструменти

слюсарний та монтажний інструмент

зварювальне обладнання

Організатор



металовироби, вироби для з'єднання та кріплення

## ДИСЕРТАЦІЯ НА ЗДОБУТТЯ ВЧЕНОГО СТУПЕНЯ



16.06.2017 р. Учанін В. М. (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів) захистив в спеціалізованій вченій раді Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України докторську дисертацію «Розроблення методів і засобів вихрострумowego

контролю матеріалів та конструкцій за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Дисертація присвячена створенню засобів і технологій вихрострумowego контролю виробів, що характеризуються високим рівнем завад. Проаналізовано джерела завад для накладних вихрострумowych перетворювачів і запропоновано їх класифікацію. Побудовано розширену класифікацію накладних вихрострумowych перетворювачів, в яку введено перспективні анаксіальні вихрострумowych перетворювачі і вихрострумowych перетворювачі подвійного диференціювання. Проведено порівняльний аналіз схем автогенераторних вихрострумowych дефектоскопів і запропоновано їх класифікацію. Побудовано схему причинно-наслідкових зв'язків впливу дефекта і зазора на параметри вихрострумowych перетворювачів і коливальної системи автогенератора. Визначено оптимальні підходи для створення автогенераторних вихрострумowych дефектоскопів. Представлено засоби вихрострумовой структуроскопії немагнітних матеріалів, побудовані на вимірюванні питомої електропровідності.

Представлено методику розрахунків сигналів вихрострумowych перетворювачів під час взаємодії з електропровідним об'єктом контролю (у тому числі з дефектом) методом об'ємних інтегральних рівнянь з використанням програми VIC-3D. Проведено оцінку похибок розрахунків сигналів вихрострумowych перетворювачів методом об'ємних інтегральних рівнянь, яка підтвердила високу ефективність запропонованої методики. Запропоновано новий спосіб визначення довжини тріщини шляхом встановлення характеристичних точок розподілу другої похідної залежності сигналу вихрострумowego перетворювача вздовж тріщини. Визначено особливості сигналів анаксіальних перетворювачів від тріщин різної довжини для різної орієнтації обмоток.

Показано, що сигнали анаксіального вихрострумowego перетворювача від тріщин різних орієнтацій і коаксіального перетворювача по-різному загасають зі збільшенням зазору між поверхнею об'єкта контролю і вихрострумowym перетворювачем. Розроблено і досліджено вихрострумowych перетворювачі подвійного диференціювання діаметром від 4 до 33 мм для контролю на різних робочих частотах. Встановлено низку особливостей формування сигналів вихрострумowych перетворювачів подвійного диференціювання від дефектів. Досліджено чутливість вихрострумowych перетворювачів подвійного диференціювання під час виявлення дефектів через шар захисного покриття.

Розроблено автогенераторні вихрострумowych дефектоскопи для виявлення поверхневих дефектів. Запропоновані технічні рішення використано для створення низки автогенераторних дефектоскопів типу ЛЕОТЕСТ ВД, які пройшли державні випробування і включені в регламент з технологічного обслуговування літаків ДП «Антонов» і авіаційних двигунів ДП «Івченко-Прогрес» і ПАТ «Мотор-Січ».

Розроблено і досліджено динамічний вихрострумowych дефектоскоп з обергальним вихрострумowym перетворювачем для виявлення дефектів в латунних заготовках теплообмінників тепловозів, подано результати впровадження дефектоскопу на ДП «Завод ім. В. О. Малишева».

Нові технічні рішення використано для створення низки вихрострумowych перетворювачів типу ВЕП-21, ВЕП-22 і ВЕПР-31 для вимірювання питомої електропровідності алюмінієвих сплавів. Показано ефективність використання структуроскопів для визначення розподілу електропровідності неоднорідних за структурою об'єктів, зокрема в зоні зварного шва із алюмінієвих сплавів. Розроблені структуроскопи використано для моніторингу експлуатаційної деградації алюмінієвих сплавів обшивок крила і фіюзеляжу літаків на ДП «Антонов». Розроблено і досліджено винесені автогенераторні вихрострумowych перетворювачі, які працюють на підвищених частотах понад 100 МГц, для контролю змін структури в поверхневих шарах. Розроблено низку структуроскопів типу АЛЬФА, ДЕЛЬТА і ВС-11ВЧ (АЛЬФА М), що працюють на робочих частотах 100, 200 і 400 МГц, для виявлення і оцінки газонасичених поверхневих шарів титанових сплавів.

Розроблено імітатор сигналів вихрострумowego контролю типу ІСВК-1 для перевірки дефектоскопів з вихрострумowymi перетворювачами подвійного диференціювання.

## XVI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

З 21 по 24 листопада на території Міжнародного виставкового центру відбувся XVI Міжнародний промисловий форум – захід, що з 2005 року входить до переліку провідних світових промислових виставок, офіційно сертифікованих та визнаних Всесвітньою асоціацією виставкової індустрії (UFI) і рік за роком залишається найбільшою в Україні виставковою подією машинобудівної тематики.

У Міжнародному промисловому форумі 2017 року взяли участь 337 підприємств із 29 країн світу. Загальна площа експозиції склала 17000 кв.м., виставку відвідали 11236 фахівців.

Відмінною рисою цього річного Промислового форуму стала значна кількість лазерного обладнання, представленого на стендах Jinan Vodor CNC Machine Co., Ltd. (КНР), ДП «Абпланалп Україна» (Київ), Інжинірингового підрозділу «АЛИСТА» ПрАТ «Дніпрополімермаш» (Дніпро), ТОВ «Арамис» (Черкаси), ТОВ «Ель-Сел Груп» (Київ), ТОВ «Машінтех» (Київ), ТОВ «Сторожук» (Київ), ТОВ «Сфера-Техно» (Київ).

Як завжди, динамічною та насиченою була спеціалізована виставка «УкрЗварювання». У її рамках цього року відбулися XII Відкритий конкурс професійної майстерності зварників України «Золотий кубок Бенардоса – 2017» та науково-практична конференція «Сучасні проблеми зварювального виробництва», організатором яких виступило Товариство зварників України. Заходи були спрямовані на підвищення престижу робітничих професій та заохочення спеціалістів-професіоналів галузі.

Учасники виставки, вітчизняні та зарубіжні компанії, представили значну кількість устаткування та матеріалів для впровадження інноваційних технологій у зварювальну галузь. На стендах компаній ПП «Ідель» (Одеса), ТОВ «КТ Україна» (Київ), ТОВ «Фроніус Україна» (Київська обл.) та багатьох інших протягом усіх чотирьох днів виставки відбувалася демонстрація роботи обладнання перед широкою аудиторією фахівців.

Серед вітчизняних лідерів у галузі зварювання та споріднених технологій свою продукцію і технології

представили ПрАТ «Машинобудівний завод Вістек» (Бахмут, Донецька обл.), ТОВ «Вітаполіс» (Київська обл.), ТОВ «Завод автогенного обладнання Донмет» (Краматорськ, Донецька обл.), ТОВ «Енергія Зварювання» (Запоріжжя), ТОВ «Суми-Електрод», ТОВ «НВФ Техвагонмаш» (Кременчук, Полтавська обл.), ТОВ «Техпоставка» (Дніпро) та інші.

Робототехнічні комплекси на виставкових стендах ТОВ «Бінцель Україна ГмбХ» (Київська обл.), ТОВ «КБ Роботікс Інженерія» (Київська обл.), ТОВ «Самміт» (Дніпро), НВФ «Техвагонмаш» (Кременчук, Полтавська обл.), ТОВ «Триада ЛТД Ко» (Запоріжжя), ТОВ «Фанук Україна» (Київ) постійно привертали увагу фахівців. Важко відвести погляд від робота-маніпулятора, який впевнено, послідовно і граційно описує траєкторію, виконуючи виробничу задачу.

Обладнання для плазмового різання металу у значній кількості було представлено на стендах українських виробничих компаній ТОВ «Аргіль ЛТД» (Миколаїв), ТДВ «Зонт» (Одеса), ТОВ «Ефект-Енерджі» та ТОВ «НТМА», (Івано-Франківськ), ТОВ «Станкосервіс-Юг» та НВП «Техмаш» (Одеса), ПП «Фаворит АМ» (Львів).

Зростання інтересу до українського ринку у світі підтверджується розширенням колективних експозицій виробничих підприємств з Китаю, Туреччини та Чехії, які цього року містили значну кількість натурних зразків продукції.

Загалом, порівнюючи якісне та кількісне наповнення виставки з попередніми роками, можна спостерігати зростання уваги до інноваційних технологій та тенденцію до їх поступового впровадження у вітчизняному виробництві. У рамках Міжнародного промислового форуму у 2017 році відбулася низка науково-практичних семінарів та конференцій, присвячених новітнім промисловим технологіям, автоматизації виробництва та контролю якості, в тому числі конференція «Сучасні технології неруйнівного контролю і можливості їх практичного застосування в машинобудівництві та суміжних галузях», організована «Українським



Виступ голови УТ НКТД проф. Троїцького В. О.



Учасники семінару



товариством неруйнівного контролю та технічної діагностики» та Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

Ця конференція, яку проводять Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики в рамках щорічного Міжнародного промислового форуму, вже стала традиційною.

У конференції взяли участь понад 80 спеціалістів – представників близько 50 організацій з різних регіонів України, серед яких Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів), Інститут технічної теплофізики НАН України (Київ), ДП «Антонов» (Київ), ПАТ «Укргідроенерго» (Київ), ТОВ «ДДАП-Ракс» (Кам'янське), ТОВ УК «Транс-ВагонСервіс» (Дніпро), ТОВ «Придніпровський ЦДОіС» (Дніпро), ТОВ «Мелитек-Україна» (Київ), ТОВ НВФ «Діагностичні прилади» (Київ), ТОВ НВФ «Ультракон» (Київ), ТОВ «Ін-трон-СЕТ Лтд» (Київ), УДВП «Ізотоп» (Київ), ДП «Інститут «УкрНДІпроект» (Київ), НТЦ неруйнюючого контролю (Київ), ТОВ «ТК «Спецмонтаж» (Київ), ДП «Колоран» ІФХ ім. Л. В. Писаржевського НАН України (Київ), ТОВ НВФ «Промсервісдіагностика» (Київ), Кременчуцька ТЕС ПАТ «Полтаваобленерго», ПАТ «Центренерго» (Київ), ВАТ «Азовзагальмаш» (Маріуполь), ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча», ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш», НТ СКБ «Полісвіт» ДНВП «Об'єднання Комунар» (Харків), ТОВ «Харківський професійний коледж», ДП «Черкаський експертно-технічний центр Держпраці», а також студенти і викладачі з профільних кафедр НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» і Національного авіаційного університету.

Відкрив конференцію Заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, академік НАН України Л. М. Лобанов. Він наголосив на актуальності впровадження нових технологій неруйнівного контролю в промисловості України для підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції, а також їх використання під час обстеження відповідальних об'єктів, що перебувають в експлуатації і потребують перевірки їх стану для подальшої безпечної роботи.

Далі учасникам конференції було представлено такі доповіді:

- В. О. Троїцький (ІЕЗ) «Вдосконалення методів підтримки технічного стану підземних трубопроводів».

- Л. М. Лобанов, В. В. Савицький (ІЕЗ) «Автоматизований широкотехнічний комплекс для неруй-

нівного контролю якості композиційних і сотових конструкцій».

- В. О. Троїцький, С. Р. Михайлов, В. М. Бухенський, Р. О. Пастовенський (ІЕЗ) «Нові технології радіаційного контролю на основі твердотільних перетворювачів».

- О. В. Мозговой (ТОВ «Придніпровський ЦДОіС») «Комплексний неруйнівний контроль стану металу об'єктів теплової і атомної енергетики».

- В. О. Троїцький, В. М. Горбик, О. С. Бородай (ІЕЗ) «Переваги технології магнітопорошкового контролю на основі скануючих намагнічуючих пристроїв».

- М. Л. Казакевич (ІФХ ім. Л. В. Писаржевського НАН України) «Технологія виявлення витоків робочих рідин ультразвуковим течошукачем сумісна з виявленням поверхневих дефектів вихрострумовим методом».

- Є. В. Шаповалов, В. В. Долиненко, В. Н. Учанін, Ю. В. Куц, В. В. Карпінський (ІЕЗ, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського») «Програмне та математичне забезпечення роботизованої системи вихрострумового неруйнівного контролю».

- Є. О. Давидов (ІЕЗ) «Застосування ультразвукових хвиль дифракції для точного вимірювання розмірів тріщиноподібних несучільностей в зварних з'єднаннях».

- В. Ю. Глухівський (ІЕЗ) «Нові тенденції в галузі теплового контролю та термографії цивільних та промислових об'єктів».

- Є. В. Деменчук (ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча») «Термографія шахт доменних печей».

- С. М. Глабець (НВФ «Ультракон») «Переваги ультразвукового контролю на основі фазованих решіток та сучасні розробки для НК українських виробників».

- С. О. Щупак (ІЕЗ) «Впровадження нових національних стандартів з НК, гармонізованих з міжнародними. Підготовка і сертифікація персоналу з НК, атестація лабораторій НК в УТ НКТД за міжнародними стандартами».

- Ю. К. Бондаренко, О. В. Ковальчук (ІЕЗ) «Оцінка ризику експлуатації зварних конструкцій на підставі моніторингу процесів системи управління якістю і проведення випробувань методами НК і ТД».

На засіданні Правління УТ НКТД, яке було проведено під час конференції, було прийнято рішення про проведення Міжнародної конференції «Неруйнівний контроль і технічна діагностика» в м. Одеса на базі готелю «Курортний» в період з 10 по 14 вересня 2018 р.

Учений секретар УТ НКТД  
А. Л. Шекеро

## НОВІ КНИГИ З АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ



*Божидарнік В.В., Скальський В.Р., Матвіїв Ю.Я.* **Діагностування руйнування скловолоконних композитів методом акустичної емісії.** – К.: Наукова думка, 2013. – 256 с.

У монографії викладено теоретико-експериментальні засади комплексного оцінювання докритичного розтріскування скловолоконних композитних матеріалів, армованих склотканиною з її довільним пошаровим укладанням у пластичні матриці. Докритичне розтріскування таких композитів є передвісником спонтанного їх руйнування під дією механічного навантаження. Об'єктом дослідження були процеси зародження й розвитку мікро- та макротріщин в об'ємі композиту, пружні динамічні поля, які при цьому виникають. Для ефективного виявлення докритичного накопичення пошкоджень розроблено науково-обґрунтовані методологічні основи акустико-емісійного діагностування з урахуванням змін параметрів пружних хвиль залежно від механізмів їх генерування. З цією метою створено фізичну модель виникнення й докритичного розвитку тріщин у матриці, когезивному шарі та скловолокні, основні положення якої верифіковано теоретично й експериментально і яка замикається на застосуванні трипараметричного критерію оцінки початку зародження руйнування.

Для наукових співробітників, інженерів-дослідників, аспірантів, студентів вищих навчальних закладів спеціальностей діагностика матеріалів і конструкцій, методи неруйнівного контролю, фізична акустика, механіка руйнування тощо.



*Скальський В.Р., Божидарнік В.В., Станкевич О.М.* **Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів.** – К.: Наукова думка, 2014. – 264 с.

У монографії представлено методику кількісного оцінювання типів макроруйнування конструкційних матеріалів за вейвлет-перетворенням сигналів АЕ, які генеруються під час руйнування твердих тіл. Вона ґрунтується на побудованих математичних моделях полів переміщень, ініційованих зміщенням поверхонь внутрішніх дископодібних у пружному півпросторі з використанням методу крайових інтегральних рівнянь. Це дало можливість теоретично оцінити параметри пружних коливань на поверхні півпростору та створити

передумови для правильного їх використання у технічному діагностуванні виробів та елементів конструкцій.

Запропоновано новий критерій кількісного оцінювання типів руйнування конструкційних матеріалів із використанням вейвлет-перетворення сигналів АЕ, який дає змогу за запропонованою методикою у будь-який момент часу ідентифікувати типи руйнування, що сприяє підвищенню ефективності АЕ-діагностування елементів конструкцій у реальному масштабі часу.

Практичне використання методики показало високу ефективність проведення діагностичних робіт на реальному обладнанні та елементах конструкцій тривалого експлуатування.

Для наукових співробітників, інженерів-дослідників, аспірантів, студентів вищих навчальних закладів спеціальностей, які мають зацікавлення до технічного діагностування та неруйнівних методів контролю, а також до механіки руйнування і міцності елементів конструкцій.



*Скальський В.Р., Божидарнік В.В., Долінська І.Я.* **Основи механіки руйнування для зварювальників: навч. посіб.** – Луцьк, 2014. – 356 с.

У навчальному посібнику викладено основи міцності та лінійної механіки руйнування.

Розглянуто деякі теоретико-методологічні аспекти оцінки характеристик міцності і пластичності, а також тріщиностійкості конструкційних матеріалів і їх зварних з'єднань. В доступній формі подано поняття про руйнування елементів конструкцій за статичного, циклічного, динамічного навантажень і за повзучості. Наведено новітні методи визначення важливих стадій розвитку тріщин методами неруйнівного контролю.

Для студентів вищих навчальних закладів, наукових працівників та інженерів-дослідників, аспірантів і викладачів.



*Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Почапський Є.П.* **Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів.** – К.: Наукова думка, 2014. – 304 с.

У монографії викладено методологічні основи відбору та опрацювання низькоенергетичних емісійних сигналів, які генеруються під час руйнування твердих тіл.

Вони побудовані на розроблених нових теоретичних підходах до ідентифікування таких сигналів на фоні завад, які існують в умовах технічного діагностування елементів конструкцій. запропоновано також нові алгоритми відбору та опрацювання сигналів, що дали змогу суттєво скоротити обсяги пам'яті оперативно-запам'ятовувальних пристроїв вимірювальних діагностичних систем. Створене алгоритмічно-програмне забезпечення використано для побудови сучасних технічних засобів оцінки ранніх стадій зародження та розвитку руйнування різних конструкційних матеріалів. Наведено їх структурні схеми і принципи функціонування. Практичне використання розробок показало високу ефективність виконання діагностичних робіт на реальному обладнанні та елементах конструкцій тривалого експлуатування.

Для наукових співробітників, інженерів-дослідників, аспірантів, студентів вищих навчальних закладів спеціальностей, які поєднані з технічним діагностуванням та неруйнівними методами контролю, а також з механіки руйнування і міцністю елементів конструкцій.



*Скальський В.Р., Ярема Р.Я.*  
**Методи розрахунку ресурсу, відновлення і відбракування кілець буксового підшипника локомотивів.** – Львів, 2015. – 288 с.

У монографії викладено методологічні основи діагностування стану буксового вузла локомотива, що полягають у їх відбракуванні,

відновленні та розрахунку залишкового ресурсу.

Методика відбракування кілець ґрунтується на комплексному застосуванні магнетного та акустичного методів неруйнівного контролю. Останній полягає у використанні випромінювання пружних хвиль акустичної емісії, яка генерується під час зародження та розвитку тріщин в об'ємі матеріалу кілець. Створена експрес-методика й обладнання для її реалізації у виробничих умовах показали свою ефективність.

Описано також методологію й обладнання для відновлення кілець у випадку їх зносу з застосуванням гальванопокривів. Розкрито підходи щодо оптимізування товщини гальванопокриву з урахуванням шкідливого впливу водню.

Запропонована методика розрахунку ресурсу кільця з наявною поверхневою макротріщиною дозволяє знайти для такого дефекту відповідний пробіг локомотива до вичерпання ресурсу.

Для інженерів-експлуатаційників, наукових співробітників, аспірантів, студентів вищих навчальних закладів спеціальностей, які поєднані з технічним діагностуванням рухомого складу залізниць.



**Метод акустичної емісії в дослідженні стоматологічних полімерів** / В.Р. Скальський, В.Ф. Макєєв, О.М. Станкевич, О.С. Кирманов, Б.П. Клим. – Львів: Кварт, 2015. – 150 с.

У монографії представлено методика діагностування зародження руйнування та розвитку

руйнування в стоматологічних ортопедичних матеріалах та конструкціях методом АЕ. Для дослідження найважливіших з практичної точки зору властивостей полімерних матеріалів, які поширені в стоматологічній практиці, використали методика визначення початку зародження та розвитку руйнування, кількісного оцінювання характеристик міцності та пластичності, в'язкості руйнування під дією навантаження (квазістатичного розтягу та стиску) за параметрами сигналів акустичної емісії, а також інших фізичних та технологічних властивостей. В основу методик покладено силовий критерій механіки руйнування, новий підхід щодо визначення об'ємної пошкодженості матеріалів методом АЕ та критерій кількісного оцінювання типів руйнування конструкційних матеріалів із використанням вейвлет-перетворення сигналів АЕ. Розроблено та модернізовано відповідне обладнання для виконання експериментальних досліджень.

За результатами проведених випробувань здійснили ранжування стоматологічних полімерів за окремими та комплексним показниками, що сприятиме підвищенню ефективності їх використання у стоматологічній практиці.

Для наукових співробітників, інженерів-дослідників, аспірантів, студентів вищих навчальних закладів спеціальностей ортопедична стоматологія, діагностика матеріалів і конструкцій, механіка руйнування тощо, а також лікарів-стоматологів.



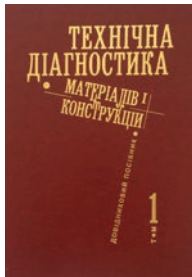
*Назарчук З.Т., Неклюдов І.М., Скальський В.Р.*  
**Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів атомних електростанцій.** – К.: наукова думка, 2016. – 306 с.

У монографії описано методологічні засади і можливості застосування засобів неруйнівного

акустико-емісійного контролю стану корпусів реакторів атомних електростанцій. Запропоновано новий підхід до оцінювання ступеня пошкодженості конструкційних матеріалів унаслідок їх тривалого експлуатування під дією водневого чинника і механічного навантаження. На результатах досліджень базуються методика акустико-емісійного діагностування. Для їх практично-

го застосування на діючих об'єктах розроблено технічні засоби, що використовують радіотелеметричну передачу даних. Засоби можуть працювати в режимі on-line і, таким чином, забезпечувати безперервний акустико-емісійний моніторинг зародження чи розвитку тріщиноподібних дефектів у структурі матеріалу. Попереднє випробування створеної апаратури показало її ефективність під час проведення діагностичних робіт.

Для наукових співробітників, інженерів-дослідників, а також аспірантів і студентів вищих навчальних закладів спеціальностей, які спеціалізуються у галузі технічного діагностування та неруйнівних методів контролю, механіки руйнування і міцності елементів конструкцій.

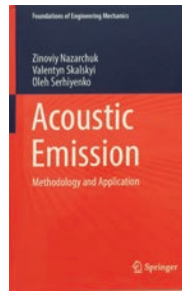


**Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: у 8-ми т. Том 1. Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є.І. Крижанівський, О.П. Остап, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, П.В. Ясній; за заг. ред. З.Т. Назарчука. – Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.**

Розглянуто явище деградації конструкційних матеріалів, яке полягає у зміні їх структурно-фазового стану і накопичення мікропошкодженості за тривалої дії температурно-силових експлуатаційних чинників та впливу робочого (технологічного) середовища, що зумовлює падіння їх фізико-механічних характеристик. Проаналізовано закономірності деградації алюмінієвих сплавів і сталей та їх зварних з'єднань різного призначення, механізми і стадійність цього процесу, його експе-

риментальне моделювання в лабораторних умовах. Запропоновано методи оцінювання деградації матеріалів в різних елементах конструкцій руйнівними методами та її моніторингу неруйнівними методами за зміною структурно-чутливих фізичних характеристик матеріалів. Сформульовано умови переходу від стадії деградації матеріалів до стадії деградації елементів конструкцій та обґрунтовано необхідність врахування деградації матеріалів при прогнозуванні робото здатності елементів конструкцій за довготривалої експлуатації.

Для наукових працівників та інженерів, які працюють у галузі проектування і експлуатації авіаційного транспорту, нафто- і газогонів, теплової і атомної енергетики та інших галузей промисловості, а також для викладачів вищих навчальних закладів і аспірантів відповідних спеціальностей.



*Nazarchuk Z., Skalskyi V., Serhiyenko O. Acoustic emission. Methodology and Application. – Springer International Publishing AG, 2017. – XIV, 283 p.*

У цій монографії детально проаналізовані фізичні аспекти явища акустичної емісії (АЕ); описано методологічні основи практичного використання акустичних емісійних пристроїв, відомі як в Україні, так і за її межами; обговорено результати теоретичного та експериментального дослідження особливостей оцінки тріщиностійкості матеріалу; і відбору корисних сигналів АЕ тощо. Ефективність методів показано в умовах діагностики різноманітних промислових об'єктів.

## ПОДПИСКА — 2018

### на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 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», «АС-Медиа», «ПресЦентр Киев», «Информнаука», «Блидінформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

Подписка на электронную версию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» на сайте: [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com).

**Правила для авторов:** [www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules)

**Лицензионное соглашение:** [www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license)

В 2018 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2016 гг.

**Контакты:**

Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-82-77  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

Подписано к печати 15.12.2017. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24  
Печать ООО «ДИА».  
03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.