

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Посыпайко, В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
Е. В. Шаповалов
ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина

В. А. Стрижало
Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

Н. П. Алешин
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович
Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич
Ин-т физической химии, Киев, Украина

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

В. В. Ключев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ
З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвёрдых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичов

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

М. Г. Чаусов

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

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины
ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев-150, 03680, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

Л. Н. Герасименко,

Н. А. Припула (отв. секретарь),

Д. И. Середа, Т. В. Юштина

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 С. А., НЕДОСЕКА А. Я., МАРКАШОВА Л. И., КУШНА- РЕВА О. С. О накоплении повреждений в материалах при разрушении.....	3
ЮЗЕФОВИЧ Р. М., ДЗЕРИН О. Ю., МАЦЬКО И. Й., ЯВОРСЬКИЙ И. Н., СТЕЦКО И. Г. Неразрушающий контроль узлов сложных машинных комплексов по взаимостатистическим характеристикам вибриционных сигналов	14
СКАЛЬСКИЙ В. Р., МАКЕЕВ В. Ф., СТАНКЕВИЧ Е. Н., КИРМАНОВ А. С. АЭ-диагностирование разрушения стоматоло- гических реставрационных материалов	21

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ТРОИЦКИЙ В. А. Мониторинг технического состояния маги- стральных трубопроводов	29
ЛОБАНОВ Л. М., ЗНОВА В. А., ПИВТОРАК В. А., КИЯНЕЦ И. В. Диагностика методом электронной широкографии дефектности элементов конструкций, изготовленных из металлических и композиционных материалов с нанесенным защитным покрытием	40
ВОРОНКИН Е. Ф., ПАСТОВЕНСКИЙ Р. О. Цифровая рентгено- графия с применением композитных экранов для неразрушаю- щего контроля в промышленности и медицине	49
БОНДАРЕНКО Ю. К., КОВАЛЬЧУК О. В. Оценка риска эксплуа- тации сварных конструкций на основе мониторинга процессов системы управления качеством и проведения испытаний мето- дами НК и ТД	56

ИНФОРМАЦИЯ

Ю. К. Бондаренко – 70	64
-----------------------------	----

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

Виходить 4 рази на рік

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Quarterly issue

Головний редактор Б. Є. Патон

Editor-in-Chief B. E. Paton

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЕКА С. А., НЕДОСЕКА А. Я., МАРКАШОВА Л. І., КУШНАРЬОВА О. С. Про накопичення пошкоджень в матеріалах при руйнуванні3

ЮЗЕФОВИЧ Р. М., ДЗЕРИН О. Ю., МАЦЬКО І. Й., ЯВОРСЬКИЙ І. М., СТЕЦЬКО І. Г. Неруйнівний контроль вузлів складних машинних комплексів за взаємостатистичними характеристиками вібраційних сигналів 14

СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., МАКЄЄВ В. Ф., СТАНКЕВИЧ О. М., КИРМАНОВ О. С. АЕ-діагностування руйнування стоматологічних реставраційних матеріалів21

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

ТРОЇЦЬКИЙ В. О. Моніторинг технічного стану магістральних трубопроводів29

ЛОБАНОВ Л. М., ЗНОВА В. А., ПІВТОРАК В. А., КИЯНЕЦЬ І. В. Діагностика методом електронної широкографії дефектності елементів конструкцій, виготовлених із металевих та композиційних матеріалів з нанесеним захисним покриттям40

ВОРОНКІН Е. Ф., ПАСТОВЕНСЬКИЙ Р. О. Цифрова рентгенографія із застосуванням композитних екранів для неруйнівного контролю в промисловості та медицині49

БОНДАРЕНКО Ю. К., КОВАЛЬЧУК О. В. Оцінка ризику експлуатації зварних конструкцій на підставі моніторингу процесів системи управління якістю і проведення випробувань методами НК і ТД56

ІНФОРМАЦІЯ

Ю. К. Бондаренко – 7064

Адреса редакції

03680, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

CONTENTS

SCIENTIFIC-TECHNICAL

NEDOSEKA S. A., NEDOSEKA A. Ya., MARKASHOVA L. I., KUSHNAREVA O. S. Accumulation of damages in materials during fracture3

YUZEFOVICH R. M., DZERIN O. Yu., MATSKO I. J., YAVORSKY I. M., STETSKO I. G. Non-destructive control of units of complicated machinery complexes according to mutual statistic characteristics of vibration signals 14

SKALSKY V. R., MAKEEV V. F., STANKEVICH O. M., KIRMANOV O. S. AE-diagnosics of fracture of dental restoration materials21

INDUSTRIAL

TROITSKY V. A. Monitoring of technical condition of main pipelines29

LOBANOV L. M., ZNOVA V. A., PIVTORAK V. A., KYIANETS I. V. Diagnostics of defectiveness of structural elements, manufactured of metal and composite materials with protective coating, applying method of electron shearography40

VORONKIN E. F., PASTOVENSKY R. O. Digital radiography with use of composite screens for non-destructive testing in industry and medicine49

BONDARENKO Yu. K., KOVALCHUK O. V. Evaluation of risk of welding structures service using monitoring of processes of the quality control system and testing using NT and TD methods...56

INFORMATION

Yu. K. Bondarenko – 7064

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11, Kazimir Malevich str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

О НАКОПЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ ПРИ РАЗРУШЕНИИ

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА, Л. И. МАРКАШОВА, О. С. КУШНАРЕВА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В статье рассмотрены закономерности возникновения и развития повреждений в материалах при их деформировании. В качестве примера подробно рассмотрено изменение структуры при растяжении образца из стали 12Х1МФ. Показано, что процесс накопления повреждений начинается с возникновением пластических деформаций, стимулирующих интенсивное движение и объединение дислокаций. Далее образуются микронесплошности, постепенно превращающиеся в поры, которые развиваются и объединяются в более крупные образования. Процесс появления повреждений достаточно хорошо регистрируется путем применения существующей технологии на основе метода акустической эмиссии. Это позволяет установить начало образования повреждений и их развитие вплоть до разрушения. Аналитическая часть технологии дает возможность построить модель накопления повреждений и разрушения. Библиогр. 20, табл. 1, рис. 13.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, пластическая деформация, структура, поры, накопление повреждений

Исследование накопления и развития повреждений проводили на образцах, изготовленных из стали 12Х1МФ. Для сокращения числа испытываемых образцов их конфигурация была выбрана из условий получения различной величины пластических деформаций на одном образце, что позволило отслеживать изменения структуры деформируемого материала в зависимости от локального значения пластической деформации. Этого эффекта удалось добиться, выполнив плавное утонение в конструкции образца гладкой выточкой по радиусу окружности. В нашем случае этот радиус был принят равным 215 мм (рис. 1).

Испытание образца проводили на гидравлической разрывной машине Р20 с использованием аппаратуры акустической эмиссии ЕМА-3 [1]. Данная аппаратура обладает необходимым программным обеспечением ЕМА 3.91, позволяющим достаточно точно определять координаты событий АЭ и получать необходимые для принятия решения характеристики этих событий.

На рис. 1 представлены результаты испытаний – гистограмма (а) событий АЭ, распределенных по длине образца (б). Принятая длина расчетной части образца – 200 мм. Показан общий кластер АЭ событий, который содержит 7 событий и место разрушения образца, находящееся в его средней части. На гистограмме представлена также последовательность возникновения АЭ событий в процессе растяжения. На рис. 1, б показан образец и его средняя часть (внизу) после разрушения. Рис. 1, в представляет график остаточной пластической деформации и возникшие АЭ осцилляции [1].

На рис. 2 приведены основные физические характеристики АЭ событий, сопровождающих раз-

рушение, полученные с помощью используемой аппаратуры. В рассматриваемом случае каждому АЭ событию соответствуют его характеристики – координата возникновения, максимальная амплитуда, количество колебаний АЭ датчиков для каждого события (осцилляции). События расположены в порядке их появления. Приведена нагрузка, при которой произошло каждое событие. Следует отметить, что развитие разрушения в связи с особенностями конструкции образца сосредоточено в области ослабления. На графике хорошо виден рост числа АЭ осцилляций, характеризующих дискретность развития повреждений структуры материала. Указанная характеристика показывает, что было зарегистрировано 61 существенное изменение в структуре материала с начала приложения растягивающей нагрузки. Это наглядно иллюстрируют приведенные на рисунке микрошлифы и, ниже по тексту, результаты физических исследований структуры. Видно также, как меняется время нарастания АЭ события, характеризующая «жесткость» протекающего процесса разрушения.

Для анализа разрушения материала по данным АЭ были проведены исследования поверхностей поперечного сечения образца в местах их появления. На рис. 3 показаны места сечения образца для исследования его внутренней поверхности.

В самом начале исследованию с помощью растровой электронной микроскопии была подвергнута поверхность в месте разрушения. На рис. 4 приведены фрактограммы поверхности разрушенного образца. Многочисленные поры видны на всей поверхности излома (рис. 4, а), а при большем увеличении наблюдаются области слившихся пор (рис. 4, в, г).

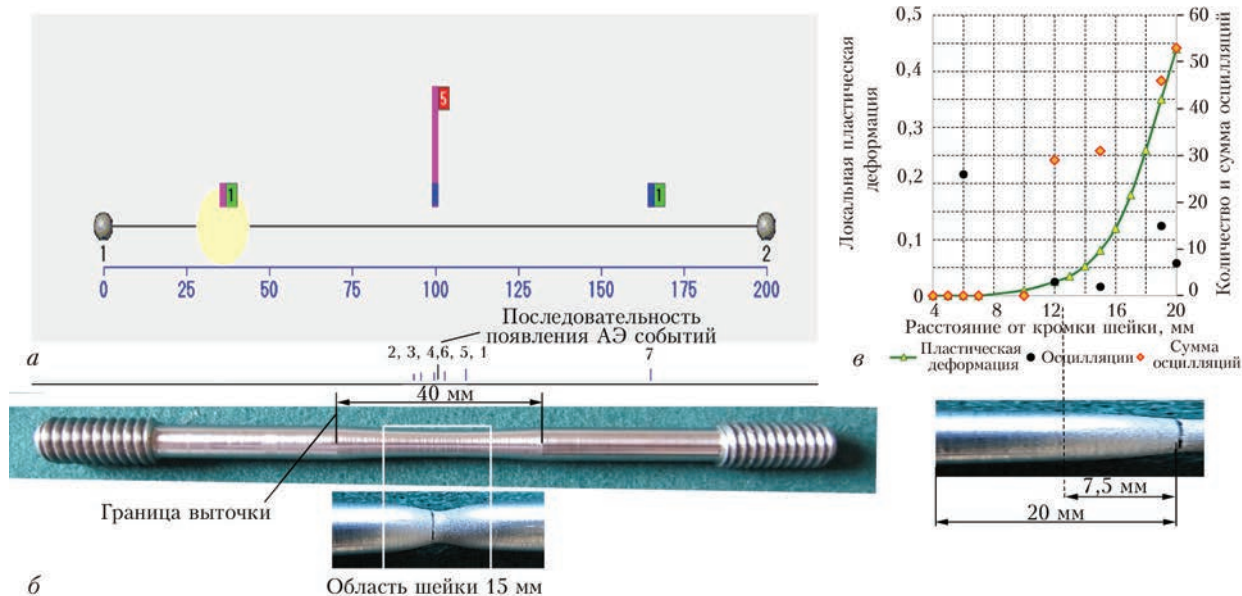


Рис. 1. Результаты распределения АЭ событий (а) по длине образца специальной конструкции (б) для проведения испытаний, а также график остаточной пластической деформации и осцилляции в событиях АЭ (в). 7,5 мм – левая граница шейки, образовавшейся в средней части образца в результате пластической деформации

Далее исследования поверхностей в местах сечений выполняли оптическим методом для выявления трещин и пор и просвечивающей электронной микроскопией для выявления перераспределения дислокационных полей в процессе деформирования.

Микроструктура сечений при увеличении в 500 раз представлена на рис. 5. Видно, что области, удаленные от мест возникновения пластической деформации, неизменны в своей структуре как при увеличении в 500 раз (рис. 5), так и 14000 (рис. 6). На рис. 5 представлены микрошлифы поверхностей среза при различных объемах пласти-

ческой деформации. На шлифах видны искажения зерен и поры, появляющиеся при достаточно больших локальных пластических деформациях. Дислокации (рис. 6) в начальной стадии не перемещаются, структура стабильна. Пластическая деформация приводит к появлению движущихся потоков дислокаций и деформированию внутренней структуры. Чем выше величина пластической деформации, тем больше искажение структуры. Кристаллы вытягиваются, начинают образовываться поры, число которых растет с увеличением деформации. При большой пластической деформации (0,44 % в данном случае) кристаллы раз-

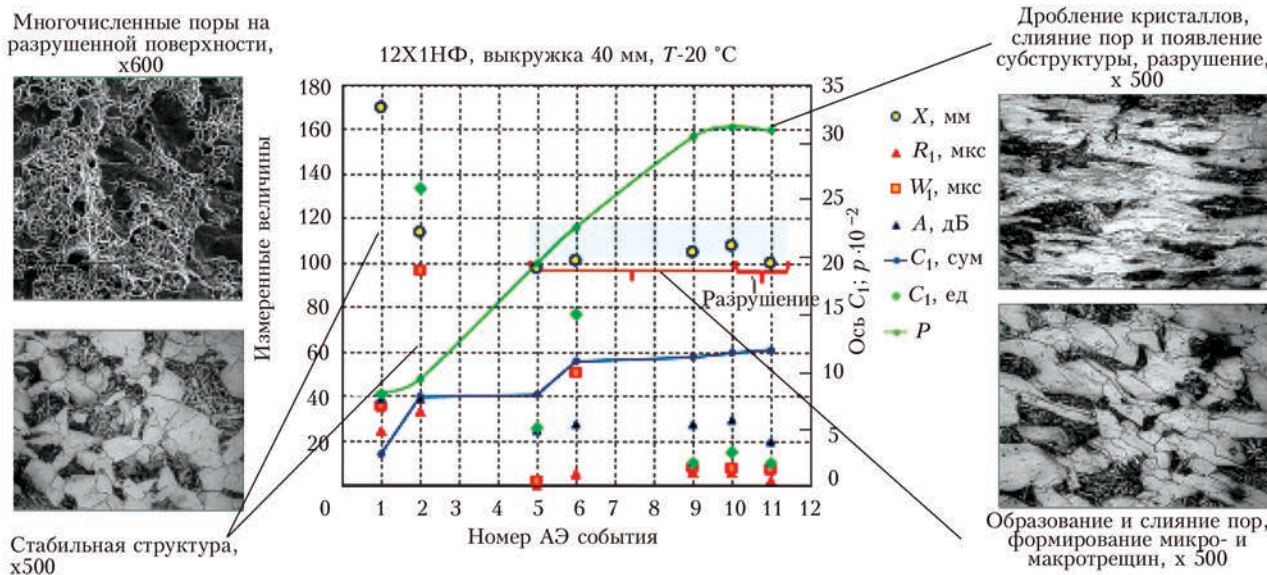


Рис. 2. Характеристики АЭ событий, зарегистрированных при испытаниях стали 12Х1МФ на растяжение (последовательность появления АЭ событий, показанных на рис. 1). Микроструктура разрушенной поверхности образца и микрошлифы зоны поперечного сечения образца в местах возникновения АЭ событий. Выделена также область, в которой стартовало и завершилось разрушение (на графике голубая полоса). Обозначения: X, мм – координата возникшего АЭ события, R_1 , мкс – время нарастания события, W_1 , мкс – длительность события, A, дБ – амплитуда события, C_1 – к-во осцилляций в событии

рушаются, появляется субструктура (рис. 6, а). В конечном счете, большое количество пор и их объединений наблюдается на фрактограмме поверхности разрушения.

Интересно отметить, что начало процессу разрушения материала задают скопления дислокаций, которые при определенных условиях перераспределения приводят к образованию микротрещин. На более ранних стадиях деформирования последние постепенно преобразуются в поры, слияние которых приводит, в конечном счете, к образованию макротрещины и последующему разрушению (рис. 6) [2–7]. Указанные явления протекают дискретно и сопровождаются возникновением акустической эмиссии, которая достаточно надежно фиксируется аппаратурой ЕМА-3. Проведенные исследования подтвердили, что разрушение материалов на заключительных стадиях деформирования связано с образованием, ростом и слиянием пор [2, 8–13]. В работе [2] показан харак-

тер разрушения стали 15Х2МФА в трех вариантах пластичности, заданных специальной термообработкой. Показано, что сталь 15Х2МФА в хрупком состоянии на заключительных стадиях деформирования также разрушается порообразованием. Поры появляются в устье образовавшейся в процессе деформирования трещины и приводят к разрушению.

Следует отметить одну особенность в динамике протекания разрушения материала 12Х1МФ. В таблице приведены данные появления событий АЭ по времени в процессе нагружения образца. Приведенные данные показывают, что перед последним событием АЭ, связанным с началом отделения частей образца друг от друга и последним из серии событий, связанных с накоплением критического объема повреждений в материале, существует достаточно длительный промежуток времени, в данном случае составляющий порядка 35,3 % от времени окончания формирования критического объема повреждений. Этот эффект показывает, что разрушение материала происходит не мгновенно по достижении им критического состояния, а спустя некоторое время. Данный эффект может иметь существенное значение на практике при эксплуатации конструкций, контролируемых системами постоянного АЭ мониторинга, поскольку иногда такой промежуток времени может оказаться достаточным для принятия решения об изменении эксплуатационных параметров до безопасного уровня.

Проведенные исследования позволяют значительно повысить эффективность АЭ контроля и создать более совершенную методику и технологию контроля разрушения материалов как на заключительной стадии разрушения (образование и слияние пор), так и на стадии более раннего обра-

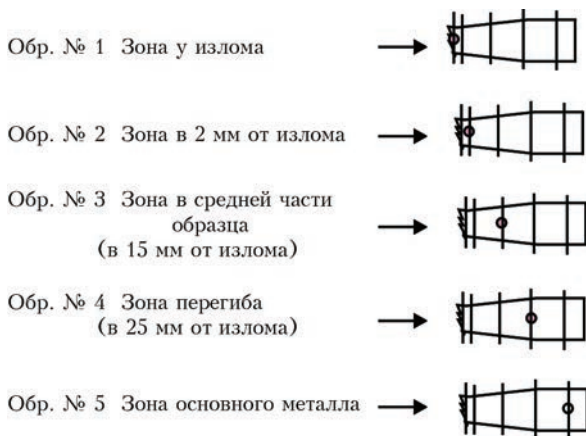


Рис. 3. Места поперечного сечения образца для физических исследований в местах появления АЭ (указаны точкой)



Рис. 4. Поры на поверхности разрушения: а – фрактография всей поверхности разрушения (×20,4); б – вид разрушенной части образца; в, г – многочисленные поры (черные точки и пятна) на поверхности разрушения (×600 и ×2010, соответственно)

зования повреждений (микротрещины, интенсивные перемещения групп дислокаций). При этом применение АЭ позволяет обнаруживать и описывать параметры дефектов на всех стадиях их возникновения и развития.

Фактически весь процесс накопления повреждений, вплоть до разрушения, может быть описан путем математического моделирования. Есть ряд различных путей построения такой модели. Ниже будет показано, как, с целью обеспечения высо-

кой достоверности получаемых при помощи модели результатов, применить сразу несколько различных независимых способов для ее построения таким образом, чтобы они служили для взаимной проверки. Такая цель была в конечном счете достигнута.

В основе созданной модели [9, 10, 14–21] лежит общая, достаточно распространенная концепция повреждаемости. Под повреждаемостью понимается деградация структуры и свойств ма-

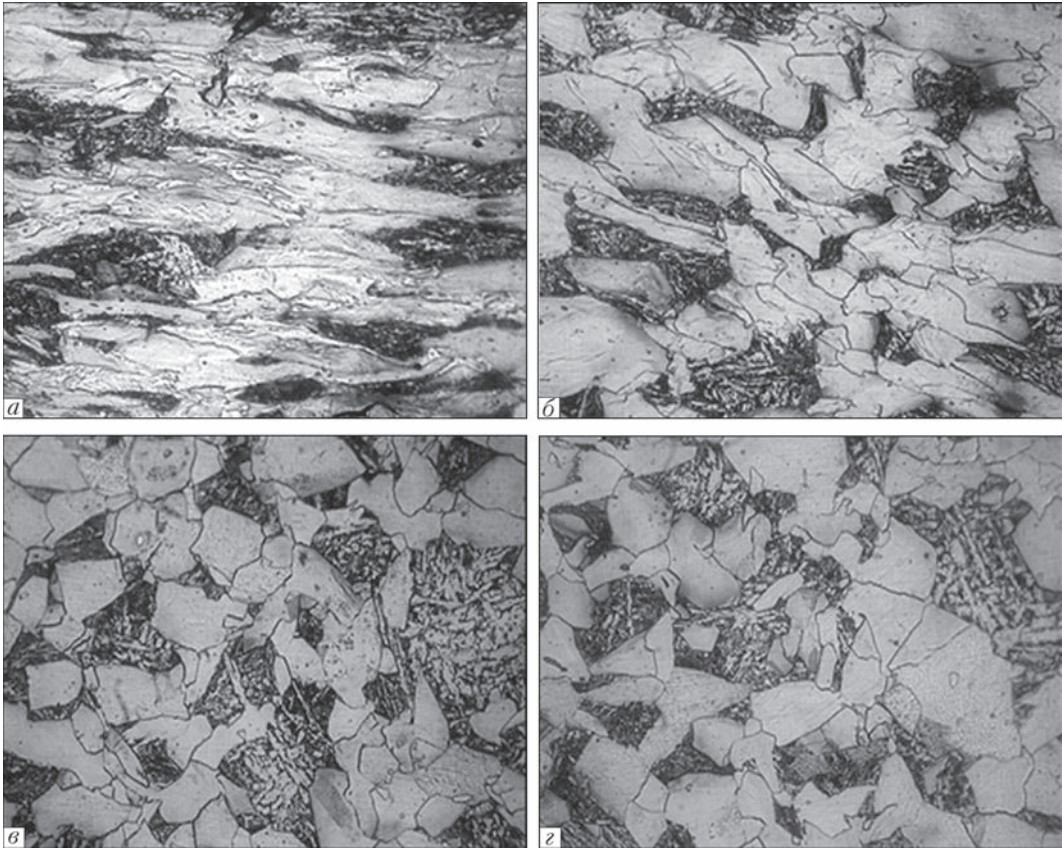


Рис. 5. Микрошлифы ($\times 500$) поверхностей среза при различных объемах пластической деформации: многочисленные поры (черные точки) видны при $\epsilon^* \cong 40...43\%$ на расстоянии 1 мм от поверхности разрушения (а) и $\epsilon^* \cong 30\%$ на расстоянии 2 мм (б); поры практически отсутствуют (в, г) вдали от зоны пластических деформаций ($\epsilon^* = 0\%$, расстояние 15 мм и более). ϵ^* – локальная пластическая деформация

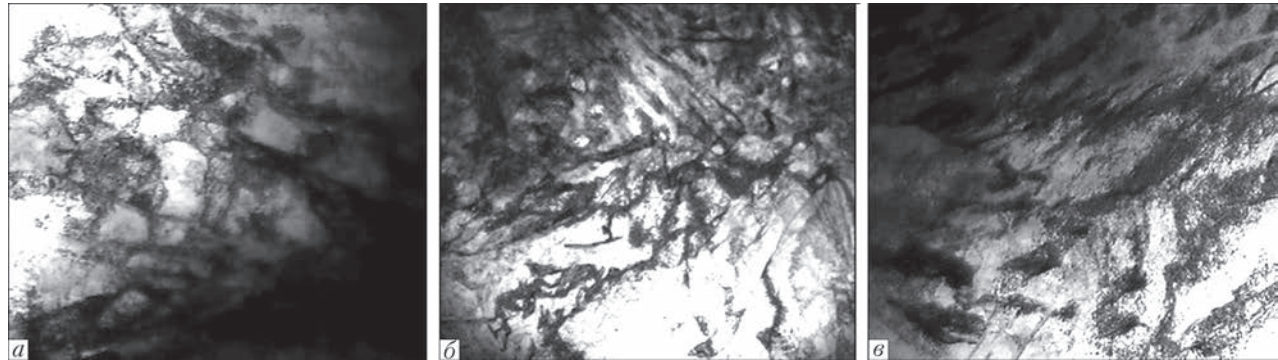


Рис. 6. Перераспределение дислокационных полей в материале при разной величине локальной пластической деформации (электронная просвечивающая микроскопия): а – $\epsilon^* = 44\%$; б – 30; в – 0 ($\times 14000$)

АЭ события и время их появления в процессе нагружения образца из стали 12Х1МФ

АЭ события	1	2	3	4	5	6	7	Разъединение поверхностей (разрушение)
Время появления события, с	81	83	123	131	164	189	286	292

териала в процессе деформирования или эксплуатационной наработки. Для количественного описания состояния повреждаемого материала использована характеристика, называемая поврежденностью. В данной работе поврежденность рассматривается как скалярная интегральная величина, относящаяся ко всему рассматриваемому объему материала. Критерий поврежденности представлен в виде:

$$\Delta W_{cp} = 1 - \frac{V_{повр}}{V_{исх}}, \quad (1)$$

где $V_{исх}$ – значение параметра V для исходного материала; $V_{повр}$ – для поврежденного [17].

Несмотря на простоту формулы (1), подтвердим ее справедливость очевидным примером. Если за $V_{повр}$ принять объем возникших в материале пор, а за $V_{исх}$ сам объем материала, то максимальное значение $\Delta W_{cp} = 1$ будет достигнуто при заполнении порами всего объема материала. В целом же в формуле критерия поврежденности можно использовать любые характеристики, меняющиеся аналогичным образом при накоплении повреждений. Проверку предлагаемой методики изначально проводили при оценке поврежденности материала по данным АЭ сканирования – метода, при котором один из датчиков АЭ выступает в качестве генератора волн, а остальные работают как приемники, позволяя отслеживать развитие поврежденности по изменениям таких параметров принятых сигналов, как амплитуда и время нарастания сигнала до максимума [8–10, 14 – 19].

Для альтернативной, не зависящей от критерия поврежденности, оценки объема повреждений используется феноменологическая зависимость:

$$V = V_0 + n\varepsilon^{1/n} + m(1 - (1 + \varepsilon)^{1/n}), \quad (2)$$

где V – объем накопленных в материале повреждений; V_0 – начальный объем повреждений; ε – деформация; n и m – экспериментальные константы. Эксперименты показали, что, используя указанную зависимость, можно рассчитывать реальный объем пор в материале, приняв $n = N V_{cp}$, где N – количество пор в материале; V_{cp} – объем средне-статистической поры [9].

Учитывая вышеизложенное, была создана компьютерная программа, моделирующая процесс накопления повреждений и соединяющая, по сути, несколько моделей одновременно. Один из первоначальных вариантов программы [14] представлен на рис. 7.

Процесс повреждаемости в рамках моделирования представлен поэтапным добавлением к уже имеющемуся некоторому начальному (возможно и нулевому) числу новых пор в заданном объеме. При этом на определенной задаваемой стадии начинается их рост. Последующее взаимодействие пор и

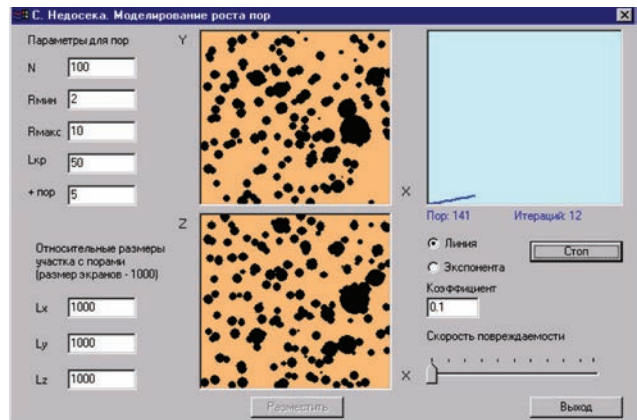


Рис. 7. Один из ранних вариантов программы, моделирующей процесс накопления повреждений. Обеспечивает задание размеров участка материала L_x, L_y, L_z , числа пор N , диапазона их радиусов R_{min} и R_{max} , расстояния сближения, необходимого для начала слияния $L_{кр}$. Рост происходит по линейному или экспоненциальному закону с выбором коэффициента

слияние приводят к заполнению порами все большего объема, и, в конечном счете, к разрушению материала. Модель, хоть и построена на имеющихся экспериментальных данных, является полностью абстрактной и позволяет варьировать условия виртуального эксперимента в максимально широком диапазоне. В данной части модели поврежденность известна заранее, что позволяет проверять справедливость для каждого рассчитываемого случая формулы (2) и уточнить входящие в нее константы.

Одновременно с виртуальным ростом и слиянием пор моделируется изменение параметров A_i и R_i сканирующих АЭ сигналов в зависимости от заполнения материала порами, где A – амплитуда выходного сигнала, R – время нарастания выходного сигнала до максимума, $i = 1 \dots 3$ – направления сканирования. И сразу же решается обратная задача пересчета этих изменений в поврежденность материала. При этом используется формула (1), в которой в качестве параметра V используется уже не объем пор, а скорость нарастания акустического сигнала до максимума $V_i = A_i/R_i$. Данная часть модели основана на экспериментальных данных, позволяющих утверждать, что перекрытие порами определенной площади материала в направлении сканирования приводит к пропорциональному уменьшению амплитуды сканирующего сигнала и увеличению времени его нарастания до максимума. Проверка показала, что получаемые данные соответствуют реальным экспериментам. Зная площади проекций пор F_1, F_2, F_3 для каждого направления сканирования, рассчитывают объем, занимаемый порами, и приближенно определяют количество пор (предполагая известным средний объем поры). Расчеты показали достаточно близкое, с разбросом не более 15 %, соответствие определенного таким образом коли-

чества пор их количеству, задаваемому при моделировании. В то же время, задавая существенно различный размер пор, либо некорректный предполагаемый средний размер поры, можно получить более значительную погрешность.

Поры в материале возникают и сливаются дискретно, о чем свидетельствует регистрация в приведенных выше экспериментах событий АЭ на стадиях их активного развития. В рамках создания математической модели накопления повреждений бы принято решение моделировать и параметры сигналов АЭ, связывая их с возникновением, ростом и слиянием пор. Физическую модель акустической эмиссии строили в предположении, что амплитуда сигналов АЭ пропорциональна объему вновь возникших в материале пустот. Программный интерфейс, созданный для реализации модели, позволяет имитировать возникновение акустической эмиссии от любого из трех факторов – возникновения пор, роста и слияния или произвольной их комбинации. Сопоставление модельных данных с экспериментальными позволило определить, что наибольшее соответствие моделируемой АЭ эксперименту достигается тогда, когда присутствуют только два из названных факторов – возникновение пор и их слияние. Это позволяет говорить о том, что, вероятно, рост пор происходит достаточно плавно и не является источником акустической эмиссии в том диапазоне сигналов, который регистрирует АЭ аппаратура.

Был проделан большой объем численных экспериментов для получения эталонных характеристик разрушения при различном размещении пор для широкого спектра условий накопления повреждений. При помощи разработанной модели получены эталоны акустической эмиссии, которые являются достаточно абстрактными, не привязанными к конкретному материалу или виду нагружения. В настоящий момент наиболее характерные эталоны используются при прогнозировании разрушающей нагрузки в программном обеспечении для АЭ систем типа ЕМА-3, ЕМА-4 [20, 22, 23].

Таким образом, при помощи модели одновременно решается несколько различных задач, а сами решения обеспечивают взаимную проверку. В процессе развития модели интерфейс программы, представленной на рис. 7, претерпел существенные изменения в соответствии с ростом возможностей и разделен на три связанных окна (рис. 8). В верхней части левого окна размещены два экрана с проекциями пор в плоскостях XY и XZ . Графики со шкалой левого окна показывают: верхний – число пор и поврежденность, нижний – непрерывную и (столбчатый) дискретную АЭ. Над ними размещена полоса, отображающая столбиками разного цвета амплитуду и причину появления импульса АЭ – возникновение, рост, слияние пор.

Среднее окно содержит несколько вкладок для управления процессом моделирования. На текущей вкладке размещены элементы управления для задания автоматического или пошагового роста пор, выбора закона роста и коэффициентов для него. Внизу окна отображаются реальные площади проекций пор в плоскостях XY , YZ , ZX .

Правое окно содержит результаты определения поврежденности материала и объема пор по данным АЭ сканирования. Параметр поврежденности обозначен как W . Среднее значение поврежденности по трем направлениям сканирования W_{cp} определяется как среднеарифметическое для W_x , W_y , W_z . Реальное значение поврежденности соответствует формуле (1), рассчитанной для объема, занятого моделируемыми порами. Расчетное количество пор определяется приближенно по заранее заданному среднестатистическому их размеру.

Программа позволяет теперь закладывать следующие гипотезы, параметры и закономерности в проводимый виртуальный эксперимент:

- связь между затуханием акустического параметра A и ростом R может зависеть от перекрытия площадей следующим образом: линейная зависимость; степенная зависимость; экспоненциальная зависимость;

- рост радиуса поры может происходить на каждой итерации следующим образом: линейно; экспоненциально; по произвольному закону в соответствии с набором точек из заранее созданного файла; произвольным образом можно задавать и нагрузку в направлении оси X ;

- закон размещения пор в материале может быть установлен: случайным (генератор случайных чисел – координат пор в заданных пределах); равномерным (попытка разместить заданное число пор в равных объемах); распределение по нормальному закону (с возможностью задавать параметры в зависимости от текущего коэффициента концентрации напряжений K_σ);

- материал в модели представлен объемом пространства в форме параллелепипеда с задаваемыми размерами в каждом направлении;

- модель позволяет учитывать слияние пор при достаточно близком их расположении. С учетом проведенной проверки работы модели и принципа Сен-Венана можно утверждать, что слияние описывается корректно при сближении пор на расстояние меньше $D/10$, где D – диаметр поры;

- имеется возможность задания нормального закона распределения пор по длине образца x , в предположении, что после нагружения образца реализуется:

$$M(x) = M_0 + \frac{K_{\text{усл}}}{S_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2s_x^2}},$$

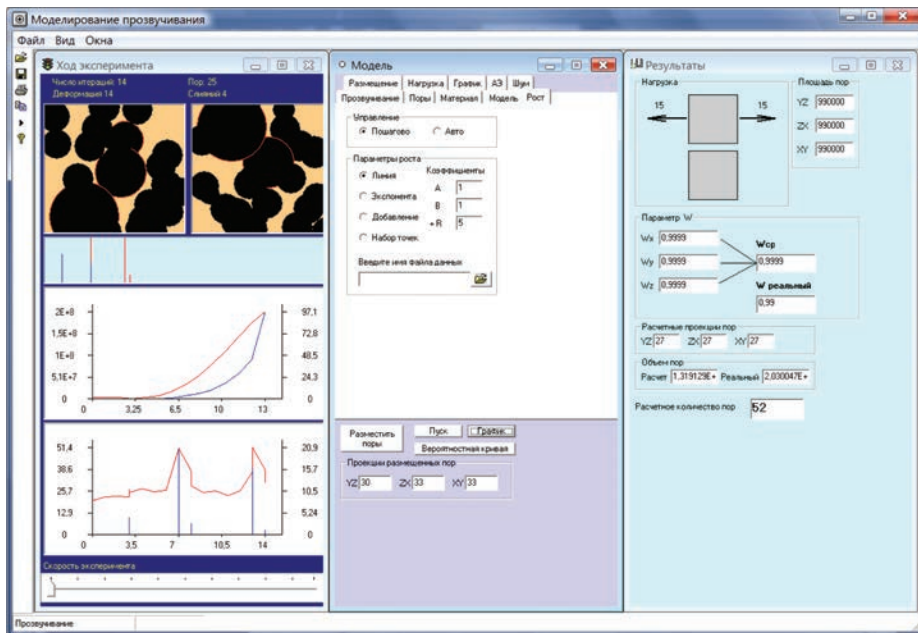


Рис. 8. Текущий интерфейс программы, моделирующей процесс накопления повреждений. Обеспечивает работу всех описанных возможностей моделирования

где M_0 – первоначальная равномерная пористость; $K_{\text{усл}}$ – коэффициент, отражающий свойства материала и условия нагружения, т. е. $K_{\text{усл}} = K_{\text{усл}}(K_{\sigma})$.

Особое внимание уделено критерию слияния пор, основанному на использовании такого параметра, как жесткость напряженного состояния. Рассмотрим систему из двух сферических пор с радиусами $R_1 < R_2$. Будем считать, что при сближении их на некоторое критическое расстояние в материале возникает локальная область, которую можно условно охарактеризовать как микрообразец.

Для такого микрообразца будет справедливым уравнение жесткости напряженного состояния $K_{\sigma} = \sigma_i / \sigma_m$, известное как параметр Бриджмена и которое можно выразить через радиус шейки и профиля такого образца как $K_{\sigma} = 1/3 + \ln(1 + R_1/2R_2)$.

Условием разрушения образца будет достижение предельной деформации $\epsilon_{\text{кр}} = \alpha \exp(-\beta K_{\sigma}) + \epsilon_n$, где α и β – коэффициенты материала, определяемые из эксперимента; ϵ_n – начальная деформация. Поскольку геометрические размеры пор и параметры напряженного состояния задаются самой моделью, на каждой стадии деформирования можно рассчитать локальную деформацию $\epsilon = \ln(R_2/R_{20})$, которая берется для большей из пор (с текущим радиусом R_2), где R_{20} – ее начальный радиус. Таким образом, условие слияния пор соответствует эквивалентному условию разрушения микрообразца.

Работа модели показывает, что при продолжении роста пор наступает определенная критическая стадия, когда за счет слияния пор начинается лавинообразный рост поврежденности вплоть до полного разделения материала либо заполнения

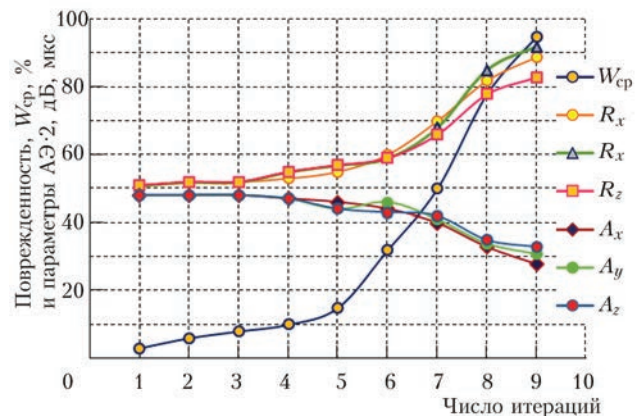


Рис. 9. Средняя поврежденность материала в процессе роста 20 пор и изменения амплитуд A_i и времен нарастания R_i акустических сигналов в трех направлениях сканирования (модель)

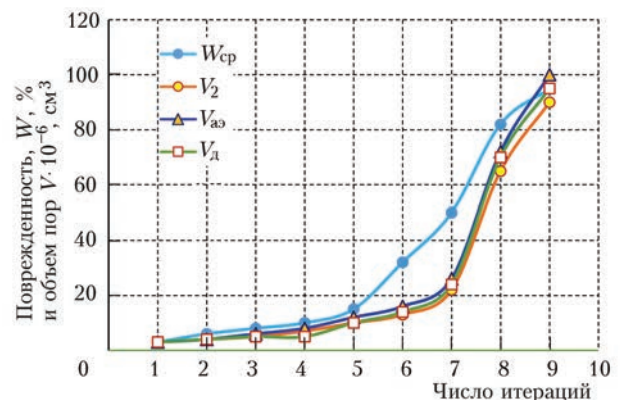


Рис. 10. Средняя поврежденность материала в процессе роста пор и сопоставление ее с действительным объемом пор, задаваемым моделью, расчетным объемом пор, получаемым двумя независимыми методами

порами всего объема. При этом эксперимент считается завершенным и дальнейшее моделирование останавливается.

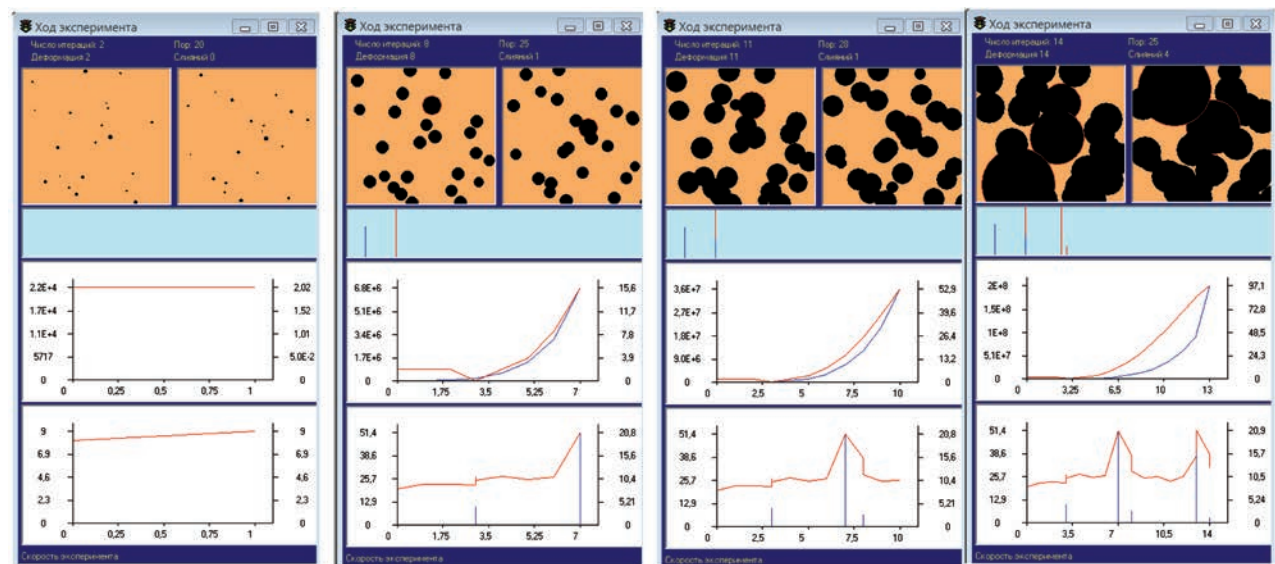


Рис. 11. Моделирование АЭ в процессе роста 20 пор. Случайный закон размещения. 14 итераций от начала эксперимента до разрушения. Показан последовательный поэтапный рост пор и их слияние

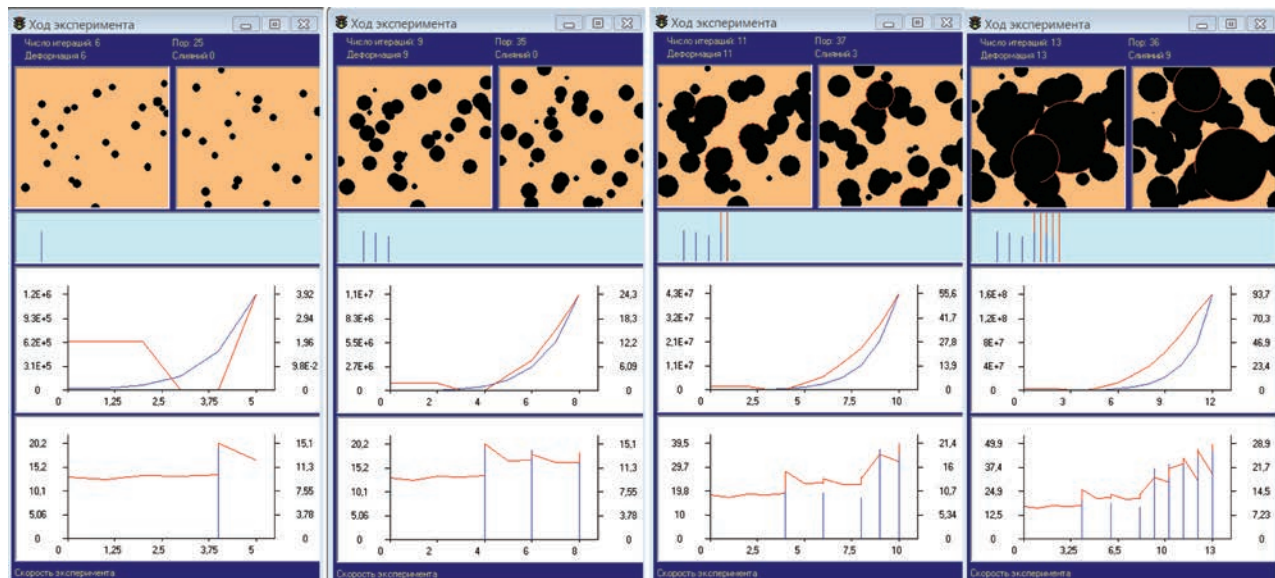


Рис. 12. Моделирование АЭ в процессе роста 20 пор с добавлением новых. Случайный закон размещения. 13 итераций от начала эксперимента до разрушения

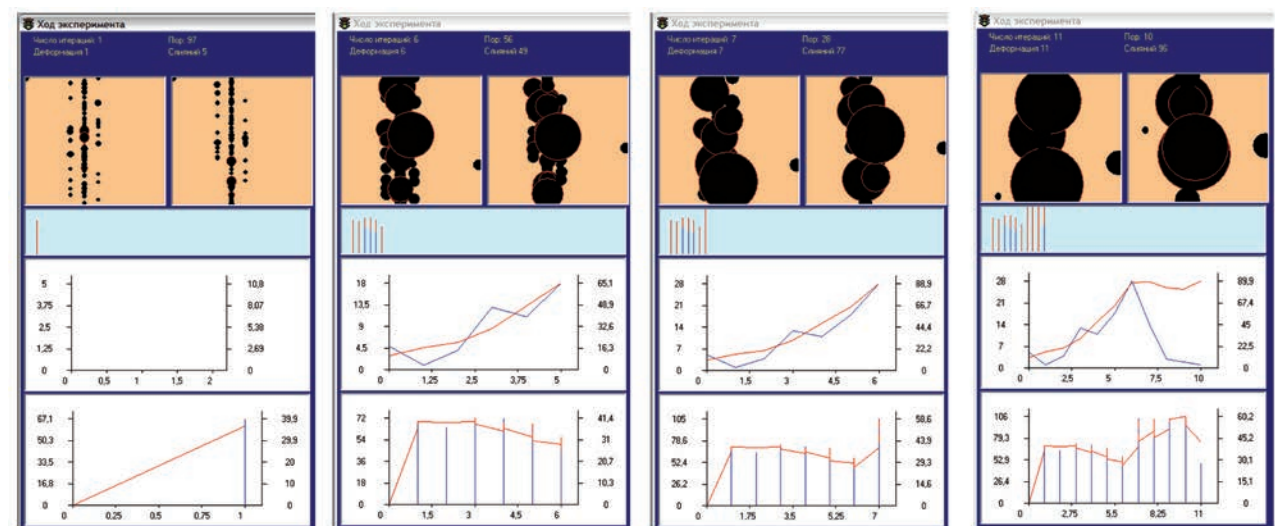


Рис. 13. Моделирование АЭ в процессе роста 100 пор при наличии концентратора напряжений. Нормальный закон размещения. 7 итераций от начала эксперимента до разрушения

Программа предусматривает построение большого числа графиков, характеризующих моделируемый процесс.

Графики на рис. 9 и 10 построены по результатам моделирования роста пор в кубе с гранью 1 см. Подобные пробы использовали для комплексного исследования поврежденности в работах [10, 13–15]. Для удобства задания в модели целочисленных начальных размеров пор [2] порядка десяти и более мкм размер куба был представлен как $1000 \text{ мкм} \cdot 10^1$.

На рис. 9 показано изменение амплитуд A_x , A_y , A_z и времен нарастания сканирующих сигналов R_x , R_y , R_z в результате частичного перекрытия растущими порами с первоначальным размером от 50 до 100 мкм соответствующих площадей поперечного сечения куба. Начальные значения амплитуд прозвучивания составляли 100 дБ, времен нарастания 100 мкс. Задан линейный закон изменения параметров сканирующих сигналов от перекрытия проекциями пор поперечного сечения. Среднее значение поврежденности (здесь $W_{\text{ср}}$) по трем направлениям сканирования рассчитано как среднеарифметическое для W_x , W_y , W_z .

Одним из наиболее показательных является график, сопоставляющий три кривые – объем пор, заданных самой моделью, объем пор, определенный по изменению акустических параметров, и объем пор, определяемый по формуле (2), где $V_0 = 0$, n меняется на каждой итерации и вычисляется как произведение текущего числа пор на средний объем поры $N_x V_{\text{ср}}$, $m = 50$. Несущественное расхождение между кривыми свидетельствует о корректности проводимого виртуального эксперимента.

Отметим, что графики по результатам работы программы строятся автоматически в программе MS Excel любых версий старше Excel 97.

Примеры нескольких компьютерных экспериментов представлены на рис. 11–13.

Образмеренные графики, расположенные под экранами с изображением проекций пор, показывают: верхний – число пор и поврежденность, нижний – непрерывную и дискретную АЭ. Над ними размещена гистограмма, показывающая разными цветами АЭ, возникшие от различных причин – возникновения, роста, слияния. Моделирование представлено поэтапно. Показаны наиболее характерные итерации, отражающие процесс роста поврежденности и возникновения сигналов АЭ. Как видим, результаты показывают абсолютно различную картину временного распределения АЭ. Этот факт и использован при создании типовых эталонов, обеспечивших в конечном счете прогноз разрушения с достаточно высокой точностью $\pm 15 \%$ и вероятностью 95 % [19, 22, 23].

Представленные на рис. 11–13 примеры интересны тем, что являются типичными и весьма

близкими к тем, которые использовались при создании действующих эталонов АЭ. В частности, вариант на рис. 13 рассматривает накопление повреждений при наличии концентратора напряжений, а в результате эксперимента получено поле повреждений, сходное с таковым при развитии трещины в пластичном материале.

В результате таких многочисленных экспериментов были получены эталоны для мелких рассеянных повреждений, отстоящих на достаточно большом расстоянии, для равномерно распределенных, для распределенных по нормальному закону с разной степенью концентрации в заданной области элемента материала. Также варьировали соотношением минимальных и максимальных размеров пор при моделировании случайных распределений.

После завершения и обработки экспериментов было отобрано немногим более 100 эталонов, наиболее подходящих, согласно проведенной проверке, для распознавания и прогнозирования текущего состояния реальных материалов.

Каждый эталон включает не только одну конкретную картину распределения повреждений в материале при заданной деформации. Эталон представляет собой набор состояний материала на нескольких итерациях, вплоть до перехода процесса слияния пор в неуправляемую стадию. Такая стадия считается соответствующей старту макротрещины, т. е. достижением критического состояния материала.

Компьютерный эксперимент показал, что для различных полей повреждений требуется различное число итераций для достижения критического состояния. Это означает, что процессы интенсивного роста, слияния пор и образования трещин соответствуют различным уровням локальных деформаций. Наиболее показательными с точки зрения соответствия реальному эксперименту являются те эталоны, в которых предусмотрено добавление небольшого числа мелких пор в процессе роста деформации, но не на каждой итерации. Таким образом, удалось воссоздать картину возникновения АЭ, весьма похожую на ту, которую регистрируют АЭ системы.

Однако оставался открытым вопрос о точном соответствии картины начального и последующего распределения повреждений, задаваемой в модели, реальному состоянию поврежденного материала и сопутствующей процессу повреждаемости акустической эмиссии.

Данная работа является определенным шагом вперед по установлению такого соответствия, поскольку в ней предпринята попытка сопоставить данные АЭ с реальной физической картиной состояния материала, полученной прямыми методами металлографических исследований. Это дает

в перспективе возможность закладывать в модель реальные размеры и координаты пор с целью повышения достоверности компьютерного эксперимента.

Конечным же результатом такого реального физического эксперимента и компьютерной модели должно являться совершенствование технологии анализа и прогноза состояния эксплуатирующихся конструкций по данным АЭ, переход от уже реализованного [16, 17, 20] распознавания опасных ситуаций к их более детальной классификации с точки зрения конкретных процессов, происходящих в материале при накоплении повреждений и разрушении.

Выводы

1. На специально разработанных образцах исследован процесс накопления повреждений и развития разрушения в стали 12Х1МФ при статическом нагружении.

2. С использованием металлографических методов и акустической эмиссии подтвержден механизм разрушения испытанных образцов путем образования, развития и объединения пор на ключевых стадиях деформирования.

3. Представлена разработанная в виде компьютерной программы математическая модель, описывающая различными, обеспечивающими взаимную проверку, способами процесс накопления повреждений и сопутствующую ему акустическую эмиссию.

4. Показано, что результаты работы модели позволили реализовать и использовать в АЭ системах типа ЕМА-3, ЕМА-4 эталоны для распознавания изменений в структуре материалов в процессе их разрушения и последующего прогноза их состояния.

5. Отмечено, что приведенные результаты испытания образцов с точной идентификацией структуры поврежденного материала позволяют в перспективе разработать методику и создать более совершенную технологию анализа развития разрушения материалов и его прогнозирования по данным АЭ.

Список литературы

1. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарева О. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 9–13.
2. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР, препринт.
3. Скальський В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 29–36.
4. Balderston H. L. (1971) The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 1971, 7-8 December, pp. 297–317.
5. Stone D. E., Dingwall P. F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation, *NDT international*, 10, 51–56.

6. Gillis P. P. (1971) Dislocation motions and acoustic emission. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7-8 December, pp. 20–29.
7. Tetelman A. S., Chow R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. *Ibid.* pp. 30–40.
8. Недосека С. А., Богинич И. О. (1995) Применение аппаратуры «ЕМА» для оценки поврежденности стали 20 акустическим методом. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 66–69.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Богинич И. О. (1995) Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении. *Проблемы прочности*, 7, 31–40.
10. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А. (1996) Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании. *Там же*, 5, 23–30.
11. Векслер Е. Я., Замекула И. В., Толстов В. Ю., Семешко Е. В. (2010) Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 23–31.
12. Векслер Е. Я., Заплотинский И. В., Замекула И. В., Толстов В. Ю. (2007) Техническое диагностирование трубной системы подогревателей высокого давления блоков мощностью 100...300 МВт в процессе длительной эксплуатации. *Там же*, 2, 17–20.
13. Стрижало В. О., Стасюк С. З. (2015) Експертна оцінка технічного стану технологічних трубопроводів з водневим середовищем. *Там же*, 4, 7–13.
14. Недосека С. А. (1998) Объектный подход к решению задач механики сплошной среды и прогнозированию состояния материалов. *Там же*, 1, 13–21.
15. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. (2000) Моделирование процесса накопления повреждений в деформируемом материале по его акустическим свойствам. *Вестник северокавказского гос. ун-та*.
16. Лебедев А. А., Недосека С. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А. (2001) Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 8–12.
17. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А. (2003) Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты. *Проблемы прочности*, 2, 29–36.
18. Лебедев А. А., Недосека С. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. (2003) Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, С. 3–8.
19. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Пилипенко А. П. (2004) Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения. *Там же*, 3, 16–21.
20. Недосека С. А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, 2, 3–9.
21. Недосека С. А. (2008) Оценка накопления повреждений и прогноз разрушения по данным АЭ. *Материалы междунар. конф. «Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие»*, 24–26 ноября 2008 г. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
22. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2005) Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 20–26.
23. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Там же*, 3, 16–22.

References

1. Nedoseka A. Ya, Nedoseka S. A., Markashova L. I., et al. (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. Lebedev, A.A., Chausov, N.G. (1988) *Express-method of evaluation of crack resistance of ductile materials*. Kiev, AN Ukr. SSR [in Russian].
3. Skalsky, V. R. (2003) Evaluation of accumulation of volume damage of solids by acoustic emission signals. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29-36 [in Ukrainian].
4. Balderston, H.L. (1971) The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. In: *Proc. of Symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials* (Bal Harbour, 1971, 7-8 December), 297-317.
5. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977) Acoustic emission parameters and their interpretation. *NDT Internat.*, **10**, 51-56.
6. Gillis, P.P. (1971) Dislocation motions and acoustic emission. In: *Proc. of Symposium presented at the Committee Week American Society for Testing and Materials* (Bal Harbour, 1971, 7-8 December), pp. 20-29.
7. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and microcracking processes. *Ibid.*, 30-40.
8. Nedoseka, S.A., Boginich, I.O. (1995) Application of EMA systems for evaluation of damage of steel 20 by acoustic method. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 66-69 [in Russian].
9. Lebedev, A.A., Chausov, N.G., Nedoseka, S.A. et al. (1995) Model of damage accumulation in metallic materials under static tension. *Problemy Prochnosti*, **7**, 31-40 [in Russian].
10. Lebedev, A.A., Chausov, N.G., Boginich, I.O. et al. (1996) Complex evaluation of damage of material at plastic deformation. *Ibid.*, **5**, 23-30 [in Russian].
11. Veksler, E.Ya., Zamekula, I.V., Tolstov, V.Yu. et al. (2010) Technology of diagnostics and assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 23-31 [in Russian].
12. Veksler, E.Ya., Zaplotinsky, I.V., Zamekula, I.V. et al. (2007) Technical diagnostics of pipe system of high pressure heaters of reactors of 100-300 MW during long-term operation. *Ibid.*, **2**, 17-20 [in Russian].
13. Strizhalo, V.O., Stasyuk, S.Z. (2015) Expert evaluation of technical condition of process piping with hydrogen-containing media. *Ibid.*, **4**, 7-13 [in Ukrainian].
14. Nedoseka, S.A. (1998) Object approach to solution of the problems of discontinuous media mechanics and prediction of state of materials. *Ibid.*, **1**, 13-21 [in Russian].
15. Lebedev, A.A., Chausov, N.G., Nedoseka, S.A. et al. (2000) Modeling of the process of damage accumulation in deformable material by its acoustic properties. *Vestnik Sevastopolskogo Gos. Universiteta* [in Russian].
16. Lebedev, A.A., Nedoseka, A.Ya., Chausov, N.G., et al. (2001) Evaluation of metal damage of operational gas pipelines by AE scanning. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 8-12 [in Russian].
17. Lebedev, A.A., Muzyka, N.R., Volchek, N.L. (2003) Control of current state of pipe metal of operational gas pipelines. Method of investigation and results. *Problemy Prochnosti*, **2**, 29-36 [in Russian].
18. Lebedev, A.A., Nedoseka, S.A., Muzyka, N.R. et al. (2003) Evaluation of pipe metal state after long-term operation in a system of main gas pipelines. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3-8 [in Russian].
19. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Pilipenko, A.P. (2004) Complex evaluation of damage of plastic materials under different loading modes. *Ibid.*, **3**, 16-21 [in Russian].
20. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, **2**, 3-9 [in Russian].
21. Nedoseka, S.A. (2008) Evaluation of damage accumulation and prediction of fracture by AE data. In: *Proc. of Int. Conf. on Welding and Related Technologies into the Third Millennium* (24-26 November 2008, Kiev, Ukraine), PWI.
22. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2005) Diagnostic systems of EMA series. Main principles and architectural features

(Review). *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 20-26 [in Russian].

23. Nedoseka, A. Ya., Nedoseka, S. A., Yaremenko, M. A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Ibid.*, **3**, 16-22 [in Russian].

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА, Л. І. МАРКАШОВА,
О. С. КУШНАРЬОВА

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

ПРО НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В МАТЕРІАЛАХ ПРИ РУЙНУВАННІ

У статті розглянуті закономірності виникнення і розвитку пошкоджень в матеріалах при їх деформації. Як приклад, докладно розглянуто змїну структури при розтягуванні зразка зі сталі 12Х1МФ. Показано, що процес накопичення пошкоджень починається з виникнення пластичних деформацій, що стимулюють інтенсивний рух і об'єднання дислокацій. Далі утворюються мікронесплошності, поступово перетворюються в пори, які розвиваються і об'єднуються в більш крупні утворення. Процес появи пошкоджень досить добре реєструється шляхом застосування існуючої технології на основі методу акустичної емісії. Це дозволяє встановити початок утворення ушкоджень і їх розвиток аж до руйнування. Аналітична частина технології дає можливість побудувати модель накопичення пошкоджень і руйнування. Бібліогр. 20, табл. 1, рис. 13.

Ключові слова: акустична емісія, пластична деформація, структура, пори, накопичення пошкоджень

S. A. NEDOSEKA, A. Ya. NEDOSEKA, L. I. MARKASHOVA,
O. S. KUSHNAREVA

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

ACCUMULATION OF DAMAGES IN MATERIALS DURING FRACTURE

The article deals with regularities of occurrence and propagation of damages in materials during their deformation. As an example, the change in the structure of the specimen of steel 12Kh1MF under tension is considered in detail. It is shown that the process of accumulation of damages begins with occurrence of plastic deformations, stimulating an intensive movement and clustering of dislocations. Further, micro-discontinuities are formed, gradually transforming into pores, which propagate and join into larger formations. The process of damage appearance is well enough registered by applying the existing technology based on the acoustic emission method. This allows establishing the beginning of damages formation and their propagation up to the fracture. The analytical part of the technology makes it possible to plot the model of accumulation of damages and fracture. 20 – Ref., 1 – Table, 13 – Fig.

Key words: acoustic emission, plastic deformation, structure, pores, accumulation of damages

Поступила в редакцію
06.04.2017

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ВУЗЛІВ СКЛАДНИХ МАШИННИХ КОМПЛЕКСІВ ЗА ВЗАЄМОСТАТИСТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Р. М. ЮЗЕФОВИЧ^{1,3}, О. Ю. ДЗЕРИН¹, І. Й. МАЦЬКО¹, І. М. ЯВОРСЬКИЙ^{1,2}, І. Г. СТЕЦЬКО¹

¹Фіз.-мех. ін.-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Інститут телекомунікації Технологічно-природничого університету. 85796, Польща, м. Бидгощ, алея проф. С. Каліського, 7

³Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ул. Степана Бандери, 12

Наведено коротку характеристику приладів вібраційного контролю та наведені основні вимоги до їх проектування. Розглянуто результати аналізу горизонтальної та вертикальної складових вібрацій підшипникового вузла вугільного конвеєра, реалізації котрих були отримані за допомогою створеної у ФМІ НАН України переносної віброакустичної системи. З використанням методів статистики періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) встановлені основні властивості характеристик періодичної нестационарності другого порядку стохастичної складової вібрації при наявності дефекту, виявлена їх висока чутливість до зміни параметрів дефекту. Показано, що взаємний ПКВП-аналіз складових вібрації дає можливість локалізувати дефекти та встановлювати їх типи. Бібліогр. 10, рис. 13.

Ключові слова: періодично корельовані випадкові процеси, прилади вібраційного контролю, інтегральна і покомпонентна функція когерентності, нестационарний аналіз, вібраційний сигнал

Необхідність переходу від контролю працездатності технічних об'єктів до діагностування дефектів, що зароджуються, приводить до пошуку таких діагностичних ознак, які відчувують незначні відхилення параметрів технічного стану від норми. Виявлення несправностей, які ще не привели до катастрофічних наслідків, визначення ступеня розвитку дефекту і його ознак можливі лише на основі детального дослідження структури вібросигналів та її зв'язку з кінематикою і динамікою механізмів.

Вібраційний сигнал є інформативним діагностичним інструментом, оскільки на основі отриманої та обробленої інформації можна оптимізувати планування поточного і капітального ремонту, збільшити міжремонтний інтервал, зменшити витрати на закупівлю запчастин та матеріалів [1]. Тому проведення періодичної діагностики є актуальною задачею.

Прилади вібраційного контролю. На даний час існує багато приладів вібродіагностичного контролю. Всі вібродіагностичні прилади можна розділити на дві основні групи: переносні та стаціонарні.

Переносні прилади вібраційного контролю об'єднані основною характеристикою – вони зручні в транспортуванні, дають користувачу велику свободу дій та можливість використання на різних об'єктах. Проте функціональні можливості та клас завдань, які може виконувати кожен з представлених приладів, достатньо різні. Користувач може легко обрати прилад в залежності від рівня складності діагностичних задач, які вимагає той чи інший тип механізмів. Існує достатньо

багато приладів у вигляді двоканальних аналізаторів вібрації, основні функції яких – контроль параметрів вібрації (швидкість, прискорення, переміщення), частоти обертання і аналіз спектральних діаграм вібрації пошкоджених вузлів машин і агрегатів, аналіз спектру в «ручному» і «автоматичному» режимі. Прилади обладнані пам'яттю, використовують п'єзоелектричні датчики вібрації, працюють в діапазоні частот 2...40000 Гц та оснащені інтерфейсом зв'язку з персональним комп'ютером через RS-232. Результат їх обробки: загальний рівень сигналу, форма сигналу, спектр, спектр огинаючої, спектр власних частот, спектр 1/3 октавний, розгін/вибіг, амплітуда/фаза, пік-фактор, ексцес, орбіта, величина струму.

Особливу увагу привертає ряд приладів фірми Bruel & Kjaer (Данія). Це віброметр типу 2250-H, аналізатори динамічних сигналів, аналізатор спектру з багатоканальними модулями вводу 3050, 3052 та 3053, що використовуються для різних вимірювань вібрації з широким набором акселерометрів, працюють в реальному масштабі часу і створені для швидких і точних вимірювань. Області застосування: випробування в транспортних засобах та на борту літака, акустичні і вібраційні випробування з низькорівневими сигналами в польових, лабораторних та інших умовах, дистанційне вимірювання. Особливості – портативність і невелика маса, інтерфейс USB 2.0, подача живлення через USB-інтерфейс. Своє місце на ринку діагностичних приладів зайняли також фірми Fixturlaser (Швеція), CSI Technologies (США) і Baltech GmbH (Німеччина). Основна галузь застосування – моні-

торинг технічного стану та діагностика дефектів механічного промислового обладнання.

Стационарні прилади вібраційного контролю використовуються для регулярного моніторингу вібраційного стану механізмів. Дані системи мають значно розширений набір функцій порівняно з портативними пристроями. Вітчизняні виробники пропонують декілька стаціонарних систем: прилад контролю віброшвидкості опор підшипника, прилад контролю вібропереміщення ротора, аналізатори спектру Zet 017 U8/-U4 (восьми- і чотириканальні). Це – багатофункціональні прилади для вимірювання параметрів спектральних складових сигналів, кореляційної структури сигналів, генерації електричних сигналів з нормованими метрологічними параметрами. Вони застосовуються для вимірювання рівнів шуму і вібрації, атестації випробувального обладнання, моніторингу стану механізмів, діагностики зубчастих передач, підшипників, роторів і турбін.

Цілу низку стаціонарних комплексів вібродіагностики представляє група компаній «ДИА-МЕХ»: комплекс вимірювання і контролю параметрів роторних агрегатів, стаціонарні комплекси вібраційного контролю і захисту роторного обладнання, напівстаціонарна система вібродіагностики, стаціонарний комплекс контролю вібрації. Основні особливості: контроль різноманітних параметрів з будь-якими налаштуваннями, відмінні технічні характеристики – розширений частотний і динамічний діапазони, високе спектральне розділення за рахунок використання сучасної багатоканальної плати АЦП і цифрових алгоритмів обробки даних, можливість контролю і аналізу будь-яких технологічних параметрів (частота обертання, температура, споживаний струм, тиск і т. д.), висока періодичність вимірювань, вбудовані алгоритми параметричного аналізу нестационарних процесів, оперативна оцінка поточного стану обладнання. Також існує ряд стаціонарних систем вібродіагностики, основна функція яких – неперервне відстеження вібраційного стану підшипникових вузлів (вібромоніторинг), контроль температури і тиску середовищ, врахування витрати рідин і пари, знаходження дефектів на стадії зародження на основі автоматизованого отримання вимірювальної інформації, її передавання, зберігання, обробка і відображення в вигляді, зручному для сприйняття оператором [2].

Основні вимоги до проектування приладів вібраційного контролю. Найбільш раціональними, на наш погляд, можна вважати прилади вібраційного контролю з використанням трьохосових датчиків (акселерометрів). Основна їх перевага над іншими в тому, що вони вимірюють вібрацію в трьох напрямках одночасно – осьовому, горизонтальному та вертикальному. Переважна більшість

діагностичних систем стоїть в колі захисту тієї чи іншої механічної системи і в разі перевищення гранично допустимого значення відключає останню з технологічного процесу, не ідентифікуючи, яка саме складова призвела до аномального значення. Ще одна перевага трьохосових датчиків – незначні габарити та мінімальна кількість з'єднувальних кабелів.

Проектування приладів вібраційного контролю з використанням електронних компонентів з високим ступенем інтеграції також призводить до збільшення розмірів та ваги.

Зрозуміло, що стаціонарні прилади вібраційного контролю (системи) не вимагають критичних умов до споживаної потужності. Протилежна картина із використанням переносних, малогабаритних приладів контролю. На контрольованих об'єктах не завжди є можливість скористатися мережею змінного струму 220 В (крани, копирі вугільних шахт, вугільні конвеєри, інфраструктура морських портів). Тому використання акумуляторів може бути доброю альтернативою мережі 50 Гц. Живлення вібродіагностичних приладів від акумуляторів ноутбука (нетбука) є оправданим, тим більше, що з використанням сучасної елементної бази можна створити системи діагностичного контролю із споживаним струмом не більше 200 мА (споживаний струм від акумулятора ноутбука через USB-порт не повинен перевищувати 500 мА). Тому ємності батареї середнього класу достатньо, щоб відібрати та занести інформацію на постійний носій від багатьох точок досліджуваного об'єкту.

Для переносних приладів вібраційного контролю також можна обмежити і набір (перелік) можливих алгоритмічно-програмних засобів, що дають можливість з достатньою імовірністю виявити ті чи інші дефекти, в тому числі ті, що зароджуються.

Інтегральна та покомпонентна функції когерентності. Для опису стохастичних зв'язків стаціонарних випадкових сигналів у частотній області широко використовується функція когерентності, яка визначається виразом [3]:

$$\gamma_{\xi\eta}(\omega) = \frac{|f_{\xi\eta}(\omega)|^2}{f_{\xi}(\omega)f_{\eta}(\omega)}, \quad (1)$$

де $f_{\xi\eta}$ – взаємна спектральна густина двох стаціонарних стаціонарно зв'язаних сигналів, а $f_{\xi}(\omega)$ і $f_{\eta}(\omega)$ – їх спектральні густини потужності. Оскільки

$$|f_{\xi\eta}(\omega)|^2 \leq f_{\xi}(\omega)f_{\eta}(\omega),$$

то для функції (1) завжди виконується умова: $0 \leq \gamma_{\xi\eta}(\omega) \leq 1$ [6]. Для незалежних сигналів $\gamma_{\xi\eta}(\omega) = 0$ для всіх $\omega \in R$. Якщо сигнали $\xi(t)$ і

$\eta(t)$ є результатом лінійних перетворень одного й того ж процесу, то $\gamma_{\xi\eta}(\omega) = 1$. Якщо функція когерентності менша від одиниці, то це є показником того, що має місце одна з трьох ситуацій: на один з сигналів впливає зовнішній шум; один з сигналів зазнав нелінійних перетворень; один з досліджуваних сигналів зазнав впливу інших. При аналізі лінійних систем функція когерентності дає можливість виділити ту частину випадкового сигналу $\eta(t)$, яка на частоті ω визначається процесом $\xi(t)$. З другого боку, різниця $1 - \gamma_{\xi\eta}(\omega)$ характеризує ту частину, яка не корелює з $\xi(t)$.

Також для визначення технічного стану механізмів циклічної дії використовують функцію когерентності, яка характеризує взаємозв'язок окремих модулюючих процесів $\xi_k(t)$ і $\eta_l(t)$. Цю функцію когерентності визначають на основі їх авто- і взаємоспектральних густин, а саме

$$\gamma_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{|f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega)|}{\left[f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{1/2}} \quad (2)$$

і називати покомпонентною, а різницю між номерами стаціонарних компонентів k і l – її порядком. У роботах [4, 5] показано, що функції (1) і (2) не змінюються при лінійних перетвореннях, а також показано доцільність їх використання при розв'язанні задач вібродіагностики.

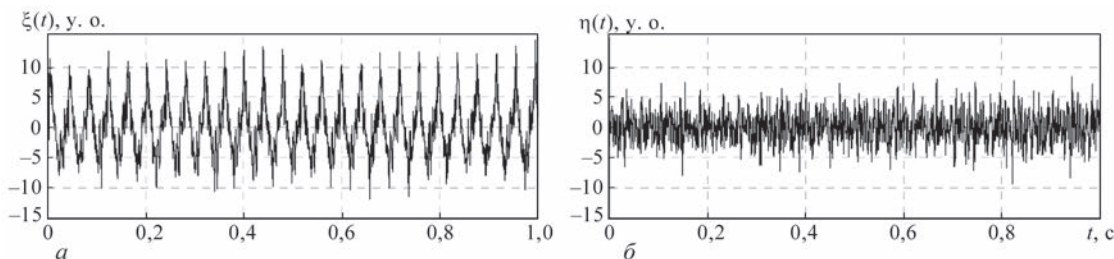


Рис. 1. Фрагмент реалізації вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації електродвигуна

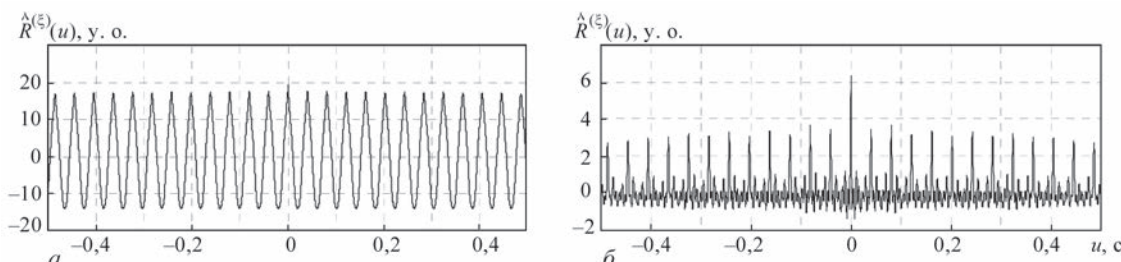


Рис. 2. Кореляційна функція вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації електродвигуна

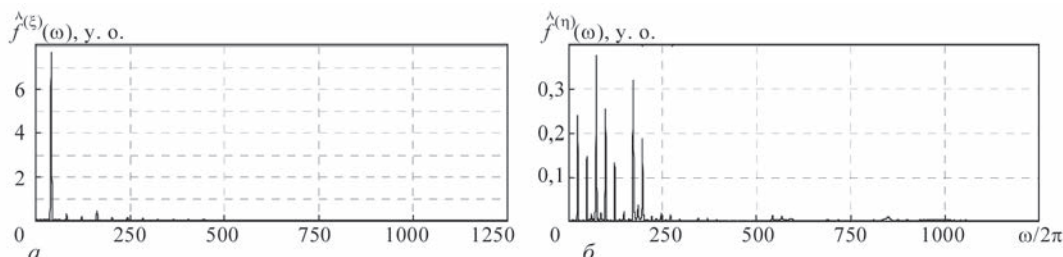


Рис. 3. Спектральна густина вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації електродвигуна

Нестационарний аналіз вібраційних сигналів.

Проведемо детальний аналіз структури вібраційних сигналів відібраних з підшипникових вузлів електродвигуна ($P = 355$ кВт, $N = 1460$ об/хв.) вугільного конвеєра за допомогою вібродіагностичної системи ПУЛЬС [6, 7] при режимі роботи без навантаження. Відповідно до стандартів ДСТУ ISO 2372, ISO 10816-1-97 даний електродвигун відноситься до 2 класу механізмів. Частоту дискретизації при відборі вібраційних сигналів вибрано 25 кГц, час запису реалізацій 20 с. Згідно роботи [8] така довжина реалізації вібраційного сигналу забезпечує похибку обробки не більше 5 %.

На рис. 1 наведено фрагмент реалізації вертикальної (рис. 1, а) та горизонтальної (рис. 1, б) складової вібрації. З наведеного (рис. 1, а) чітко видно коливання основної гармонічної складової (25 Гц).

Графіки кореляційної функції вертикальної складової (рис. 2) вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні вказують на те, що у вертикальній і горизонтальній складових сигналу присутня потужна детермінована складова. Співвідношення сигнал/шум для вертикальної складової 30:1, а для горизонтальної – 3:1. Хвости кореляційних функцій мають характер незатихаючих коливань з частотою, що відповідає частоті обертання вала (25 Гц). Кореляційна функція горизонтальної складової містить викиди 25 Гц.

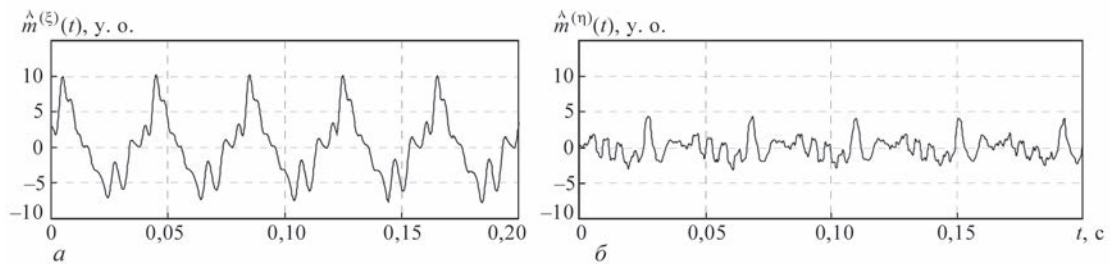


Рис. 4. Математичне сподівання вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації електродвигуна

Спектральна густина потужності вертикальної складової вібраційного сигналу (рис. 3, а) в стаціонарному наближенні містить основну гармонічну складову, що відповідає частоті обертання вала (25 Гц), на яку припадає понад 90 % потужності детермінованих коливань вібраційного сигналу та кілька кратних до неї малопотужних гармонік. Спектральна густина потужності горизонтальної складової вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні зосереджена у смузі частот до 250 Гц, містить основну гармонічну складову, що відповідає частоті обертання вала (25 Гц) та кілька кратних до неї потужних гармонік (рис. 3, б).

З використанням методу найменшого квадрату розділено детерміновану та стохастичну складові вібраційного сигналу та проведено аналіз кожної з

них окремо. На рис. 4 наведено графік математичного сподівання вертикальної (рис. 4, а) та горизонтальної (рис. 4, б) складової сигналу, на яких чітко проявляються коливання основного періоду.

Серед компонентів Фур'є математичного сподівання вертикальної складової вібрації значущими є перші сім гармонік (рис. 5, а), найпотужнішою серед яких є перша, на яку припадає 75 % потужності коливань, а горизонтальної – значущими є вісім гармонік (рис. 5, б), найпотужнішими серед яких є третя, четверта, п'ята і сьома, на які припадає понад 80 % потужності коливань.

Графік стохастичної складової вертикальної та горизонтальної складових вібраційного сигналу показано на рис. 6.

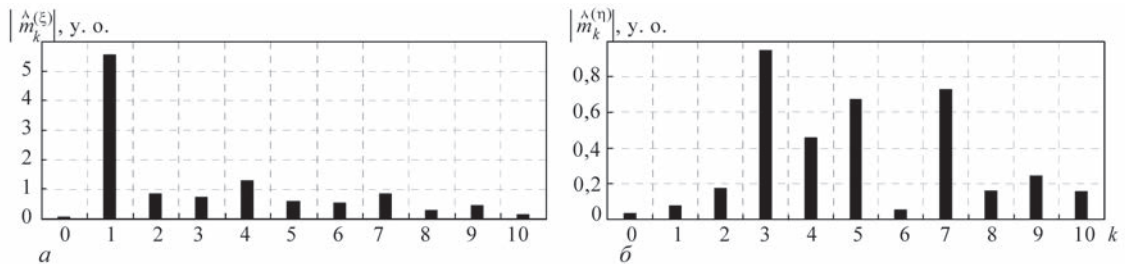


Рис. 5. Компоненти матсподівання вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації

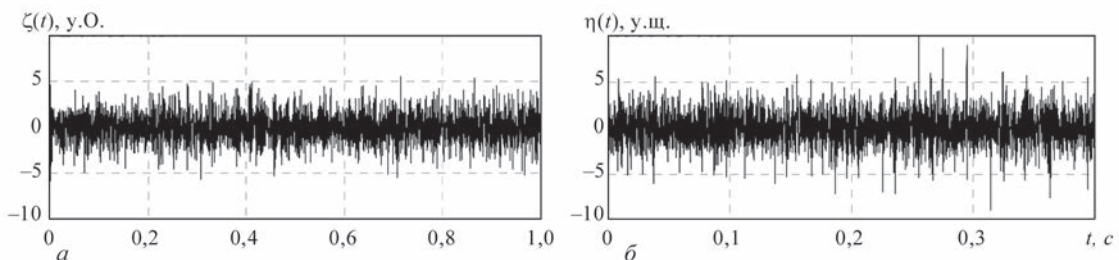


Рис. 6. Стохастична складова сигналу вертикальної (а) та горизонтальної (б) складової вібрації

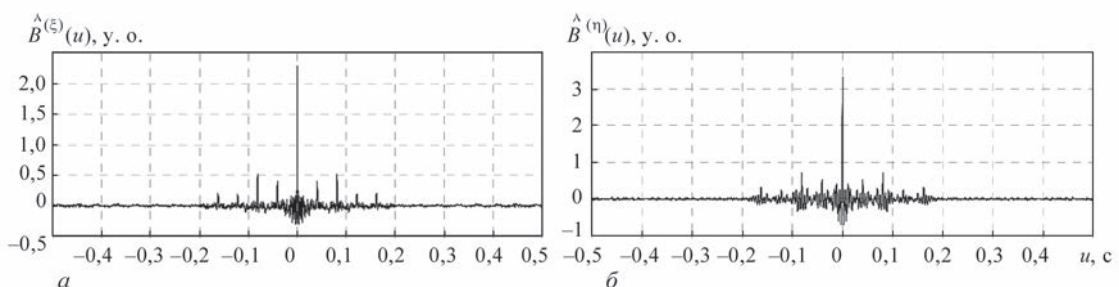


Рис. 7. Кореляційна функція стохастичної складової вертикальної (а) та горизонтальної (б) вібрації

Затихаючий хвіст кореляційних функцій вертикальної (рис. 7, *а*) і горизонтальної (рис. 7, *б*) складових у стаціонарному наближенні свідчить про відсутність у ній детермінованих коливань. З графіків чітко видно, що на хвостах кореляційних функцій присутні викиди, що відповідають частоті обертання валу (25 Гц).

Спектральні густини потужності стохастичної складової вертикальної (рис. 8, *а*) та горизонтальної (рис. 8, *б*) складових вібраційного сигналу в стаціонарному наближенні мають піки на частоті обертання та кратних до неї частотах.

Використовуючи когерентний кореляційний функціонал для пошуку прихованих періодичностей 2-го порядку у стохастичній складовій вібраційного сигналу виявлено потужну модуляцію стаціонарними випадковими процесами частоти 24,67 Гц (0,040535 с), що відповідає частоті обер-

тання валу. Залежність даного функціоналу від пробного періоду для вертикальної і горизонтальної вібрації показано на рис. 9.

Оцінивши значення періоду не стаціонарності, проведемо повний нестаціонарний аналіз структури стохастичної складової вібраційного сигналу. За допомогою компонентного методу оцінено дисперсію та її компоненти Фур'є. Відношення мінімального значення дисперсії за період до максимального для вертикальної складової є 0,29 (рис. 10, *а*), а для горизонтальної – 0,28 (рис. 10, *б*). Як видно з (рис. 10, *б*) дисперсія має значний викид за період.

Серед значущих компонентів дисперсії вертикальної складової є перші три, найпотужнішим серед яких є нульовий (рис. 11, *а*), а горизонтальної – перші п'ять, найпотужнішим серед яких є нульовий (рис. 11, *б*).

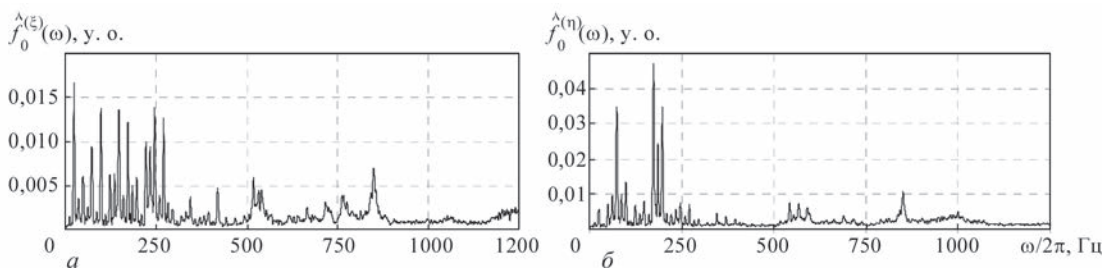


Рис. 8. Спектр стохастичної складової вертикальної (*а*) та горизонтальної (*б*) вібрації електродвигуна

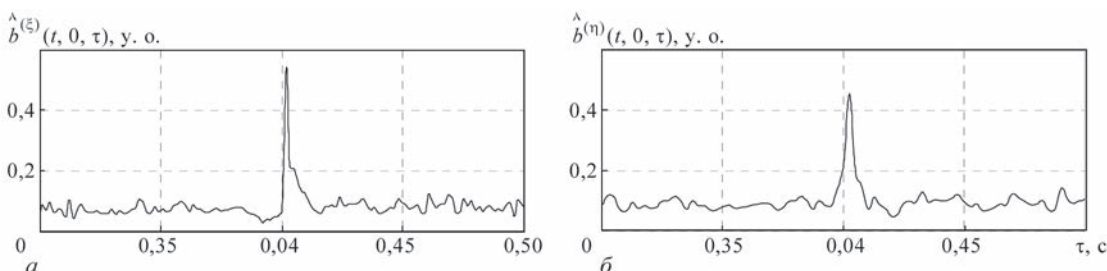


Рис. 9. Функціонал визначення періоду стохастичної складової вертикальної (*а*) та горизонтальної (*б*) вібрації

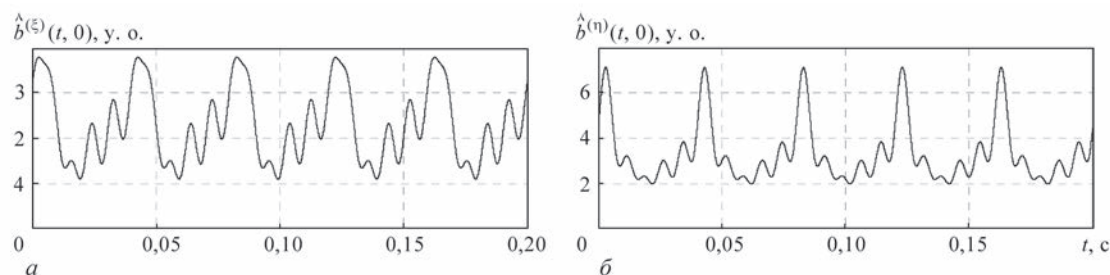


Рис. 10. Дисперсія стохастичної складової вертикальної (*а*) та горизонтальної (*б*) вібрації

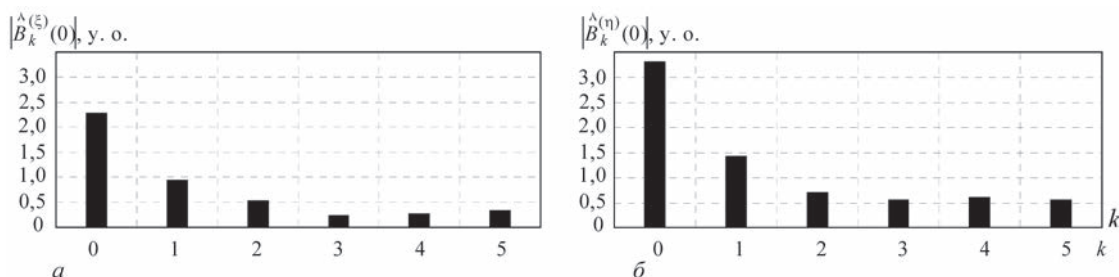


Рис. 11. Компоненти дисперсії стохастичної складової вертикальної (*а*) та горизонтальної (*б*) вібрації

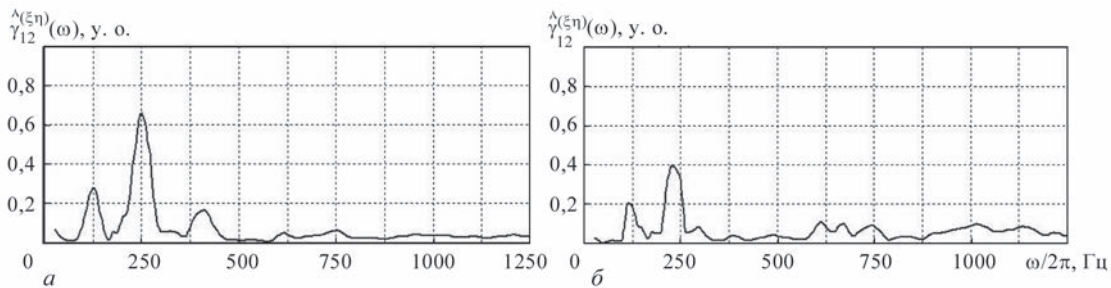


Рис. 12. Оцінка інтегральної функції когерентності $k = 0$ (а) і $k = 1$ (б)

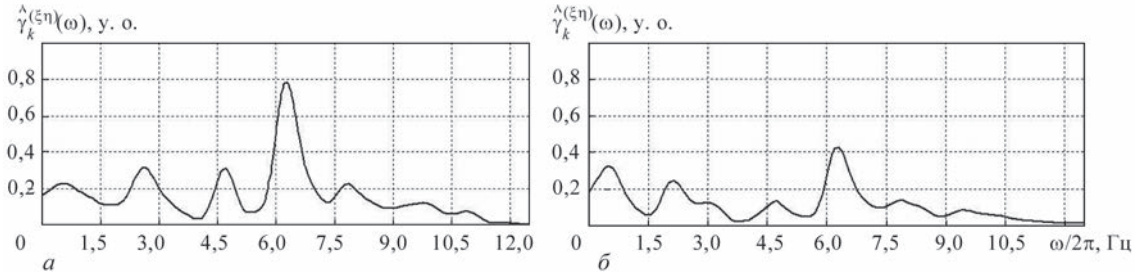


Рис. 13. Покомпонентна функція когерентності 1-го (а) та 2-го (б) порядків

Таким чином, провівши нестационарний аналіз вібраційних сигналів, можна стверджувати, що в підшипникових вузлах електродвигуна вугільного конвеєра присутній розвинутий дефект. Для встановлення типу дефекту проведемо взаємкореляційний [9] та взаємспектральний [10] аналізи вібраційних сигналів та визначимо інтегральну та покомпонентну функції когерентності.

Інтегральна функція когерентності (рис. 12) має вигляд гребінки в області низьких частот, яка є помітно зсунутою відносно області частот, що відповідають частотам гармонік обертання вала 24,67 Гц (0,040535). Незначні підвищення значень появляються також у вищій області частот.

Частотні залежності покомпонентної функції когерентності (рис. 13) також мають щитоподібний вигляд з найбільшим максимумом біля частоти, яка відповідає $1/4$ частоти обертання вала.

Такі властивості функцій когерентності можна пояснити наявністю розподіленого дефекту – нерівномірного навантаження на зовнішнє кільце, а також появи його локального руйнування.

Висновки

Розглянуто існуючі методи та засоби контролю стану вузлів обертових механізмів, що дозволяють, як правило, виявляти розподілені дефекти або розвинуті дефекти присутні у ньому. Підтверджено, що використання нестационарного підходу до аналізу вібраційних сигналів дає можливість локальні дефекти вузлів механізму на ранній стадії їх зародження, що в свою чергу дозволяє уникнути аварійних ситуацій. Показано, що поява дефекту у вузлі механічної системи призводить до того, що вібраційні сигнали набувають властивостей періодичної нестационарності 2-ого порядку і можуть бути описані у вигляді періодично корельованих випадкових процесів, а діагностичні

ознаки, побудовані на імовірнісних характеристиках періодичної нестационарності 2-ого порядку є чутливішими до збільшення дефекту, ніж ті, що побудовані на основі детермінованої складової вібраційного сигналу. Застосування взаємостатистичних характеристик вібраційних сигналів, а саме проведення взаємкореляційного і взаємспектрального аналізів, з використанням інтегральної та покомпонентної функції когерентності дає можливість виявити та встановити тип дефекту.

Список литературы

1. Мигущенко Р. П. (2014) *Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів*, Харків, «Підручник НТУ «ХПІ».
2. Клюев В. В. (1978) *Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник*. В 2-х кн. Кн. 1. Москва, Машиностроение.
3. Кравець І. Б., Юзефович Р. М., Стецько І. Г., Дуб П. Б., Яворський І. М. *Вібраційна діагностична система*, Україна, Пат. 102759, МПК G01M 13/04, H03K 3/84, G01V 1/40.
4. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Мацько І. Й. та ін. (2015). Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 36–41.
5. Яворський І. М. (2013). *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*, Львів, ФМІ НАН України.
6. Бендат Дж., Пирсол А. (1989). *Прикладной анализ случайных данных*. Москва, Мир.
7. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Мацько І. Й., Закжевски З. (2016). Функція когерентності взаємозв'язаних періодично нестационарних випадкових процесів. *Известия Вузов. Радиоэлектроника*, 59, 3, 40–51.
8. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Мацько І. Й., Закжевски З. (2017). Покомпонентна функція когерентності взаємозв'язаних періодично нестационарних випадкових процесів. *Там же*, 60, 1, С. 37–49.
9. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Кравець І. Б. (2012). Взаємкореляційний когерентний аналіз періодично нестационарних випадкових сигналів. *Вибір і обробка інформації*, 36, 5–13.
10. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Мацько І. Й. (2016). Когерентний взаємспектральний аналіз часових рядів. *Там же*, 43 (119), 32–38.

References

1. Migushchenko, R.P. (2014) *Elements of inspection and diagnostics of vibration object state*. Kharkiv, Manual of STU KhPI [in Russian].
2. Klyuev, V.V. (1978) *Tools and systems for measurement of vibration, noise and impact*. In: Refer. book 1. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Kravets, I.B., Yuzefovych, R.M., Stetsko, I.G. et al. *Vibration diagnostic system*. Pat. Ukraine.102759, Int. Cl. G01M 13/04, H03K 3/84, G01V 1/40 [in Ukrainian].
4. Yavorskyi, I.M., Yuzefovich, R.M., Matsko, I.J. et al. (2015) Development of vibrodiagnostic system for determination of industrial equipment defects with application of methods of non-stationary statistical treatment of vibration and acoustic oscillations. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 36-41 [in Russian].
5. Yavorskyi, I.M. (2013) *Mathematical models and analysis of stochastic oscillations*. Lviv, FMI NAS of Ukraine [in Ukrainian].
6. Bendat, J., Pirsol, A. (1989) *Applied analysis of hash*. Moscow, Mir [in Russian].
7. Yavorsky, I.M., Yuzefovich, R.M., Matsko, I.Y. et al. (2016) Coherence function of interrelated periodically nonstationary random processes. *Izv. Vuzov, Radioelektronika*, **59** (3), 40-51 [in Russian].
8. Yavorsky, I.M., Yuzefovich, R.M., Matsko, I.Y. et al. (2017) Componentwise coherence function of interrelated periodically nonstationary random processes. *Ibid.*, **60**(1), 37-49 [in Russian].
9. Yavorskyi, I.M., Yuzefovych, R.M., Kravets, I.B. (2012) Cross-correlation coherent analysis of periodically nonstationary random signals. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **36**, 5-13 [in Ukrainian].
10. Yavorskyi, I.M., Yuzefovych, R.M., Matsko, I.Y. (2016) Coherent cross-spectral analysis of time series. *Ibid.*, **43**(119), 32-38.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ УЗЛОВ СЛОЖНЫХ МАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПО ВЗАИМОСТАТИСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Р. М. ЮЗЕФОВИЧ^{1,3}, О. Ю. ДЗЕРИН¹, И. Й. МАЦЬКО¹,
И. Н. ЯВОРСКИЙ^{1,2}, И. Г. СТЕЦКО¹

¹Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Институт телекоммуникации Технологически-естественно-технического университета. 85796, Польша, Быдгощ, аллея проф. С. Калиского, 7

³Национальный университет «Львовська политехника», г. Львов, ул. Степана Бандеры, 12

Дана краткая характеристика приборов вибрационного контроля и приведены основные требования к их проектированию. Рас-

смотрены результаты анализа горизонтальной и вертикальной составляющих вибраций подшипникового узла угольного конвейера, реализации которых были получены с помощью созданной в ФМИ НАН Украины переносной виброакустической системы. С использованием методов статистики периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) установлены основные свойства характеристик периодической нестационарности второго порядка стохастической составляющей вибрации при наличии дефекта, обнаружена их высокая чувствительность к изменению параметров дефекта. Показано, что взаимный ПКСП-анализ составляющих вибрации дает возможность локализовать дефекты и устанавливать их типы. Библиогр. 10, рис. 13.

Ключевые слова: периодически коррелированные случайные процессы, приборы вибрационного контроля, интегральная и покомпонентная функция когерентности, нестационарный анализ, вибрационный сигнал

NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF UNITS OF COMPLICATED MACHINERY COMPLEXES ACCORDING TO MUTUAL STATISTIC CHARACTERISTICS OF VIBRATION SIGNALS

R. M. YUZEFOVYCH^{1,3}, O. YU. DZERYN¹, I. Y. MATSKO¹,
I. M. YAVORSKYI^{1,2}, I.G. STETSKO¹

¹G. V. Karpenko Physical-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: roman.yuzefovych@gmail.com

²Institute of Telecommunications of the Technological and Natural University, 7, prof. S. Kaliskego ave., 85796, Bydgoszcz, Poland

³Lviv Polytechnic National University, Lviv, 12 Stepana Bandery str.

A brief description of vibration control devices and main requirements to their designing are given. The results of analysis of the horizontal and vertical components of vibrations of the bearing unit of the coal conveyor were considered, the realizations of which were obtained with the help of the portable vibroacoustic system created at the PhMI of the NAS of Ukraine. Using the methods of statistics of periodically correlated random processes (PCRP), the main properties of characteristics of the second-order periodic nonstationarity of the stochastic vibration component were established in the presence of a defect, their high sensitivity to change in the defect parameters was detected. It is shown that mutual PCRP-analysis of the vibration components makes it possible to localize the defects and establish their types. 10 – Ref., 13 – Fig.

Keywords: periodically correlated random processes, vibration control devices, integral and componentwise coherence function, non-stationary analysis, vibration signal

Надійшла до редакції
03.02.2017



Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, НВФ «Діагностичні прилади»
в дні роботи XVI Міжнародного промислового форуму-2017
(21-24.11.2017) проводить Науково-технічний семінар

**«Нові технології неруйнівного контролю і можливості їх практичного застосування
в машинобудуванні та суміжних галузях»**

Семінар відбудеться 22 листопада 2017 року у Міжнародному виставковому центрі за адресою:
м. Київ, Броварський проспект, 15 (ст. метро «Лівобережна»).

АЕ-ДІАГНОСТУВАННЯ РУЙНУВАННЯ СТОМАТОЛОГІЧНИХ РЕСТАВРАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ¹, В. Ф. МАКЄЄВ², О. М. СТАНКЕВИЧ¹, О. С. КИРМАНОВ²

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

E-mail: skalsky.v@gmail.com

²Львівський нац. медичний ун-т ім. Данила Галицького. 79010, м. Львів, вул. Пекарська, 69.

E-mail: ort_stom@meduniv.lviv.ua

Розглянуто особливості руйнування різних типів стоматологічних матеріалів для тимчасових ортопедичних конструкцій та ендокоронки під навантаженням розтягу та стиску, відповідно. Для аналізу сигналів акустичної емісії використовували неперервне вейвлет-перетворення. За енергетичним критерієм встановили розподіл характерних типів макро-руйнування для кожного матеріалу. Результати досліджень корелюють із відомими у літературі. Встановлено, що для обох видів різних за природою стоматологічних матеріалів спільною ознакою є чергування в'язкого та в'язко-крихкого руйнування з крихким протягом всього часу навантаження зразків. Бібліогр. 28, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: стоматологічні матеріали, руйнування, акустична емісія, вейвлет-перетворення, енергетичний критерій

У сучасній ортопедичній стоматології розрізняють три типи реставраційних матеріалів: кераміку, метали, полімери [1]. Метали, зважаючи на їхню високу міцність та жорсткість, використовують з урахуванням необхідності для протеза витримувати значні механічні навантаження. Водночас здатність швидко проводити тепло та неестетичність протеза обмежують їх застосування. Натомість широкого розповсюдження набули кераміка та полімери, які є термоізоляторами, мають світлий колір і напівпрозорість, що зумовило їх використання для захисту зубів від зміни температури ротової порожнини та для створення естетичних пломб і протезів, які відновлюють природний вигляд натуральних зубів. Часто практикують комбінації матеріалів різної хімічної природи, оскільки жоден із них окремо не можна визнати ідеальним.

Стан проблеми. Із літературних джерел відомо результати оцінювання основних фізико-механічних властивостей стоматологічних полімерів [2–5] та кераміки [6–8]. Зазвичай визначають такі показники, як міцність на розрив та згин, відносне видовження під час розриву, модуль пружності, міцність за прогину, питому ударну в'язкість та інші. Однак для ефективного клінічного використання тих чи інших реставраційних матеріалів, крім знання їхніх механічних властивостей, важливо знати динаміку процесів руйнування. Таку інформацію можна отримати, використавши під час механічних випробувань метод акустичної емісії (АЕ). У низці публікацій представлено результати досліджень різних стоматологічних полімерів [9–11]. Так, у праці [9] аналізували концентрацію напружень і руйнування навколо краю зубного композитного зміцнювача. Визначили до-

мінуючу смугу частот сигналів АЕ, які генерувались під час полімеризаційної усадки. Встановили кореляцію механізмів руйнування (порушення зчеплення зміцнювача, відшаровування шару покриття від основи, зародження та поширення тріщин) з інтенсивністю та амплітудою сигналів АЕ. Розподіл сигналів під час твердіння суттєво відрізнявся від аналогічного, що генерувався внаслідок поширення тріщин у міжфазних ділянках. Збільшення величини міжфазного розриву призводило до інтенсивнішого розтріскування вздовж краю і, відповідно, до зростання інтенсивності АЕ.

Метод АЕ використали також під час дослідження руйнування стоматологічних полімерів для виготовлення тимчасових конструкцій [10–12]. Встановлено, що під дією навантаження у полімерах протікають різні типи руйнування (в'язке, в'язко-крихке, крихке), які чергуються між собою. За критеріальним параметром неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ оцінено типи руйнування таких матеріалів під час квазістатичного розтягу та здійснено їх ранжування за показником крихкості [10] та тріщиностійкості на початкових стадіях руйнування [11].

Тріщиностійкість трьох типів стоматологічних композитів досліджували в праці [13]. На основі аналізу значень в'язкості руйнування, моделей генерування АЕ та характеру поверхні руйнування побудували мікроскопічну модель тріщини, яку використали для кількісного оцінювання тріщиностійкості. У праці [14] за допомогою методу АЕ та оптичної когерентної томографії вивчали поширення мікротріщин в керамічному реставраційному матеріалі, який використовують у зубних підкладках, та розвиток розшарування в між-

фазному зв'язку кераміка/дентин під час втомного навантаження. Стан поверхні керамічних реставрацій для трьох випадків навантажень та особливості поширення в них тріщин досліджували в праці [15]. Відомо також про застосування методу АЕ для вивчення особливостей усадки стоматологічних матеріалів під час їх полімеризації [16, 17].

Отже, застосування явища АЕ дає змогу ефективно оцінювати зародження та розвиток руйнування в стоматологічних матеріалах, вивчати динаміку його поширення, а також ідентифікувати різні механізми руйнування.

Метою досліджень є аналіз особливостей та ідентифікування типів руйнування різних стоматологічних матеріалів за енергетичним критерієм вейвлет-перетворення (ВП) сигналів АЕ.

Методика досліджень. Відомо велику кількість праць, присвячених аналізу не лише потоку сигналів АЕ під час випробувань матеріалів, але й окремих сигналів для їх детального розшифрування та ідентифікування. Однак складність параметричного опису поширення пружних хвиль в обмеженому, дефектному, анізотропному середовищі наразі не дає змоги розробити єдину теорію ідентифікування сигналів, а відтак і джерел АЕ. Розрізняють різні типи руйнування залежно від стадій його розвитку та особливостей структури матеріалу [18]. В основу відомих методик АЕ-ідентифікування покладено аналіз параметрів сигналів АЕ: амплітуди, частотного спектру, енергії тощо. Останнім часом серед методів цифрового опрацювання сигналів набув розвитку метод вейвлет-перетворення, який є ефективним засобом локалізації й класифікації особливих точок нестационарних сигналів і дає можливість здійснювати аналіз одночасно в частотній та часовій областях.

Зокрема, для дослідження структурних особливостей сигналів використовують неперервне вейвлет-перетворення (НВП) [19]. Неперервне (інтегральне) вейвлет-перетворення вихідного сигналу $s(t) \in L^2(R)$ задають формулою

$$W(a, b) = \left(s(t), \psi_{ab}(t) \right) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

$$\text{де } a, b \in R, a \neq 0; \psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right).$$

Базисні функції $\psi_{ab}(t)$ називають вейвлетами. Їх утворюють шляхом масштабування та зсуву деякої функції-прототипу $\psi(t)$ (аналізуючий, базисний або материнський вейвлет). Завдяки зсуву за незалежною змінною $(t-b)$ вейвлет має можливість зміщуватись уздовж всієї числової осі будь-якого сигналу, а шляхом зміни масштабу a (у фіксованій точці $(t-b)$ часової осі) «аналізувати» частотний спектр сигналу в певному околі визначеної точки.

Для аналізу сигналів АЕ скористались програмним середовищем AGU-Vallen Wavelet (Vallen

Systeme), де за функцію-прототип вибрали вейвлет Габора у вигляді

$$\psi_g(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{t^2}{2} \left(\frac{\omega_0}{\gamma} \right)^2 + i\omega_0 t \right],$$

де ω_0 – центральна частота і $\gamma = \pi(2\ln 2)^{1/2} = 5,336$ [20].

У результаті НВП отримують спектр коефіцієнтів кореляції $W(a, b)$ сигналу з вейвлетом, який зображають поверхнею у тривимірному просторі. На основі проєкції спектра на площину з ізолініями можна прослідкувати зміну інтенсивності амплітуд вейвлет-перетворення на різних масштабах і в часі. Крім того, зображають картини ліній локальних екстремумів цих поверхонь, так званий скелетон, які дають змогу виявити структуру досліджуваного процесу. Великі значення вейвлет-коефіцієнтів означають наявність у сигналі значних флуктуацій у даний момент часу і одночасно хорошу відповідність огинаючої сигналу і вейвлета. Більше вираженим особливостям сигналу відповідають вищі значення вейвлет-коефіцієнтів. Встановивши ділянку часу, якій відповідає такий коефіцієнт, можна її детально проаналізувати, визначити тривалість і частотний склад.

Відомо, що на формування сигналу АЕ впливають такі параметри джерела як енергія, що виділяється під час деформації чи руйнування, та величина деформації. Своєю чергою, величина, швидкість та механізми деформації пов'язані з частотою й енергією пружної акустичної хвилі, яка виникає під час деформації (руйнування). Раніше [10–12] для ідентифікування типів руйнування стоматологічних полімерів використали критерій, який ґрунтується на оцінці сигналів АЕ у локальні моменти часу, коли вейвлет-коефіцієнт $W(a, b)$ набуває максимального значення. Оскільки побудований критерій, як показала практика, має несуттєву межу переходу між значеннями критеріального параметра для зв'язко-крихкого руйнування, то запропоновано оцінювати сигнали АЕ за енергією локальних максимумів НВП сигналів АЕ, які характеризують кожний елементарний акт руйнування [21].

Особливості локальних імпульсів АЕ сигналів оцінювали за наступним алгоритмом:

- будували НВП сигналу АЕ;
- за проєкцією НВП на площину « $WT-t$ » у момент досягнення максимального значення $WT_{\max}$ визначали інтервал $[t_1; t_2]$ та тривалість Δt випромінювання імпульсу за рівнем $0,5WT_{\max}$;
- за допомогою графічного редактора Origin8 апроксимували огинаючу $WT(t)$ проєкції локального імпульсу на площину « $WT-t$ » функцією $WT_a(t)$ та знаходили коефіцієнти апроксимації A, B, C, D для неї;

– обчислювали енергію E_{WT} локального імпульсу сигналу АЕ за співвідношенням [21]

$$E_{WT} = \int_{t_1}^{t_2} |WT_a(t)|^2 dt, \quad (1)$$

де $WT_a(t) = A + B e^{-0,5\left(\frac{t-C}{D}\right)^2}$ – функція апроксимації локального імпульсу;

– за значеннями параметра E_{WT} локальних імпульсів ідентифікували тип руйнування матеріалу згідно з енергетичним критерієм [21]: $E_{WT} \leq 0,01$ – пластична деформація; $0,01 < E_{WT} \leq 0,1$ – мікротріщиноутворення; $E_{WT} > 0,1$ – крихке руйнування (ріст макротріщини).

Результати обчислень усереднювали для всіх зразків кожного виду матеріалу.

Результати досліджень та їх обговорення. Досліджували руйнування різних стоматологічних матеріалів: полімерів для тимчасових ортопедичних конструкцій (розтяг) та матеріалів для ендокоронки (стиск). Під час випробувань паралельно проводили відбір АЕ-інформації за допо-

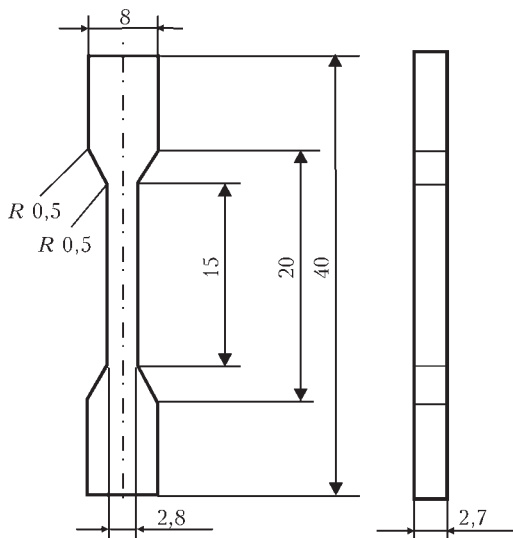


Рис. 1. Геометрія полімерних зразків (мм)

могою акустико-емісійної вимірювальної системи SKOP-8 [22]. Режими АЕ-вимірювань: тривалість вибірки – 0,5 мс; період дискретизації аналогового сигналу – 0,25 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот – 600 кГц, фільтра високих – 200 кГц; поріг дискримінації – у межах 30 %. Коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 70 дБ (40 дБ – попередній підсилювач), смуга частот – 0,2...0,6 МГц. Відносна похибка реєстрації амплітуди сигналів АЕ не більше $\pm 10\%$. У режимі постопрацювання будували діаграми розтягу та АЕ-активності, НВП зареєстрованих сигналів АЕ, здійснювали відповідні розрахунки та їх аналіз.

Особливості руйнування стоматологічних полімерів. Реалізацію методики досліджень здійснювали під час квазістатичного розтягу полімерних зразків із провізорних матеріалів Protemp™ 4 (3M ESPE, США), Structur 2SC (VOCO, Німеччина), Tempron 1-IPKG (GC, Японія), Acrodent (АО СТОМА, Україна). Розміри зразків зображено на рис. 1.

З отриманих діаграм розтягу [11] випливає, що всі матеріали руйнувалися квазікрихко. Як приклад, на рис. 2, а зображено типову діаграму розтягу та АЕ-активності зразка з полімеру Acrodent, а на рис. 2, б деталізовано розподіл амплітуд сигналів АЕ в довільно вибраному інтервалі 3,5... 4,0 % відносної деформації зразка, який на рис. 2, а обведено пунктирною лінією.

Побудувавши НВП сигналів АЕ, зареєстрованих під час розтягу зразка полімеру Acrodent, та обчисливши енергію їх локальних максимумів, здійснили ідентифікування типів руйнування за наведеним вище енергетичним критерієм. Як бачимо, на різних ділянках діаграми розтягу (рис. 2) чергуються сигнали АЕ різних амплітуд. Раніше [23] гіпотетично це пояснювали чергуванням крихкого (стрибкоподібний ріст тріщини) і в'язкого (утворення і розвиток пластичних деформацій) руйнування. Але якщо застосувати до сигналів вейвлет-перетворення, то можна стверджувати,

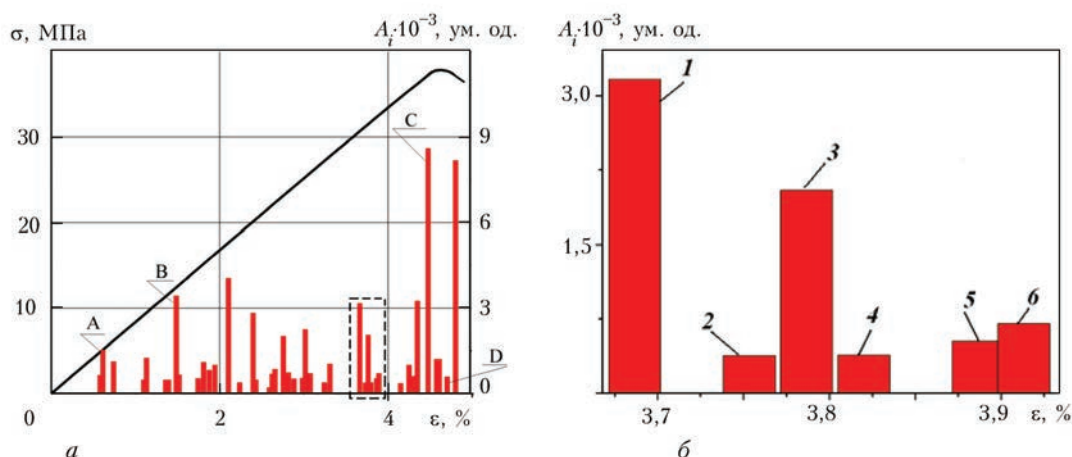


Рис. 2. Діаграма розтягу та АЕ-активності для зразка стоматологічного полімеру Acrodent (а) та розподіл амплітуд сигналів АЕ в інтервалі 3,5...4,0 % відносної деформації зразка (б) (опис А–Д та 1–6 див. у тексті)

Таблиця 1. Значення локальної енергії сигналу та відповідний йому тип руйнування у матеріалі Acrodent за енергетичним критерієм НВП сигналів АЕ

Сигнал АЕ	E_{WT}	Тип руйнування
A	0,010	В'язко-крихке
B	0,023	" "
C	0,100	Крихке
D	0,006	В'язке
1	0,100	Крихке
2	0,007	В'язке
3	0,031	В'язко-крихке
4	0,003	В'язке
5	0,003	" "
6	0,010	В'язко-крихке

що ці гіпотези підтверджуються, оскільки для них отримаємо відповідні значення енергії локальних збурень (імпульсів), які за побудованим енергетичним критерієм дають можливість здійснити відповідне ідентифікування. У табл. 1 представлено результати ідентифікування для сигналів, які генерувались під час розтягу зразка полімеру Acrodent: A, B, C, D із рис. 2, а та 1, 2, 3, 4, 5, 6 із рис. 2, б.

Як впливає з табл. 1, під час розтягу полімеру відбувається чергування сигналів АЕ, які відповідають різним типам руйнування, що можна тлумачити як розвиток мікро- та макророзтріскування з утворенням пластичних зон перед тріщиною, відповідно.

На рис. 3 показано кількісні показники наявності різних типів руйнування під час експериментальних випробувань стоматологічних полімерів.

Із рис. 3 бачимо, що енергетичний критерій дає можливість виокремити для всіх матеріалів події АЕ, що відповідають пластичній деформації, чого не вдалось зробити раніше за допомогою к-критерію [11]. Це ще раз підтверджує ефективність застосування енергетичного підходу щодо ідентифікування типів, а відтак і механізмів руйнування в матеріалах.

За результатами аналізу НВП особливістю сигналів АЕ, які супроводжують крихке руйнування, є порівняно велике значення максимального вей-

лет-коефіцієнта WT_{max} , вузька смуга частот Δf та велика тривалість випромінювання Δt . Для НВП сигналів АЕ, які супроводжують в'язке чи в'язко-крихке руйнування, WT_{max} та тривалість випромінювання, є значно меншими, ніж для крихкого, а відповідна смуга частот суттєво ширша. Частота f_{max} , за якої досягається WT_{max} , у випадку крихкого руйнування є меншою, ніж за в'язкого чи в'язко-крихкого, оскільки, як відомо, збільшення розмірів дефекту (крихке руйнування) сприяє зменшенню домінуючої частоти відповідних пружних коливань [24].

На рис. 4 зображено НВП характерних сигналів АЕ, які відповідають крихкому (рис. 4, а) та в'язко-крихкому (рис. 4, б) руйнуванню провізорного матеріалу Protemp.

У даному випадку для сигналу АЕ за крихкого руйнування $WT_{max} = 0,15$, ширина смуги частот у проекції « $WT-f$ » на рівні $0,7WT_{max}$ $\Delta f = 0,11$ МГц, тривалість випромінювання $\Delta t = 17,5$ мкс, частота, що відповідає WT_{max} , $f_{max} = 312$ кГц (рис. 4, а). За в'язко-крихкого руйнування $WT_{max} = 0,046$, $\Delta f = 0,15$ МГц, $\Delta t = 10$ мкс, $f_{max} = 359$ кГц (рис. 4, б).

Особливості руйнування стоматологічної кераміки та композитів. Досліджували зразки зі стоматологічних матеріалів для ендокоронки (прескераміка – IPS e.max Press, металокераміка – GC Initial MC та стоматологічний композит – FineNanoQ) по 5 штук кожного виду. Вони мали форму дисків товщиною 5 мм та діаметром 13 мм. Зразки навантажували стиском за допомогою кулькового індентора (діаметр кульки 4 мм) зі швидкістю його переміщення 0,12 мм/хв. На рис. 5 представлено структурну схему навантаження та відбору АЕ-інформації. Зразок 6 встановлювали на опору 1, між ними закріплювали хвилевід 2 та відповідну прокладку 3 для усунення завад. Для відбору АЕ-інформації на хвилевід встановлювали первинний перетворювач АЕ 4. Навантаження здійснювали за допомогою кулькового індентора 5.

Для визначення напружень, які виникають у місці контакту кульки індентора з матеріалом зразка, використовували розв'язок пружної задачі Герца [25]:

$$\sigma_c = 0,918 [P / (D^2 \gamma^2)]^{1/3}, \tag{2}$$

де $\gamma = (1 - \nu_1^2) / E_1 + (1 - \nu_2^2) / E_2$.

Тут σ_c – максимальні напруження стиску в області контакту; D – діаметр кульки; ν_i – коефіцієнт Пуассона тіл контакту ($i = 1, 2$); E_i – модуль пружності тіл контакту ($i = 1, 2$); P – прикладена сила.

У табл. 2 представлено використані в розрахунках характеристики стоматологічних матеріалів, взяті з літературних джерел. Кулька індентора виготовлена зі сталі ШХ15, для якої модуль пружності $E_1 = 211$ ГПа, а коефіцієнт Пуассона $\nu_1 = 0,25$ [26].

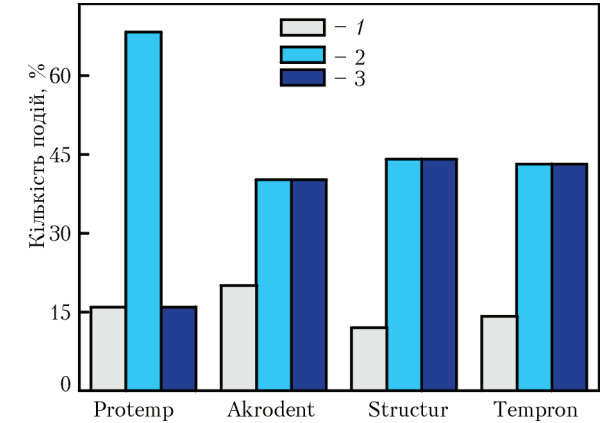


Рис. 3. Розподіл локальних імпульсів, які відповідають різним типам руйнування стоматологічних полімерів за енергетичним критерієм: 1 – пластична деформація; 2 – мікророзтріскування; 3 – крихке руйнування

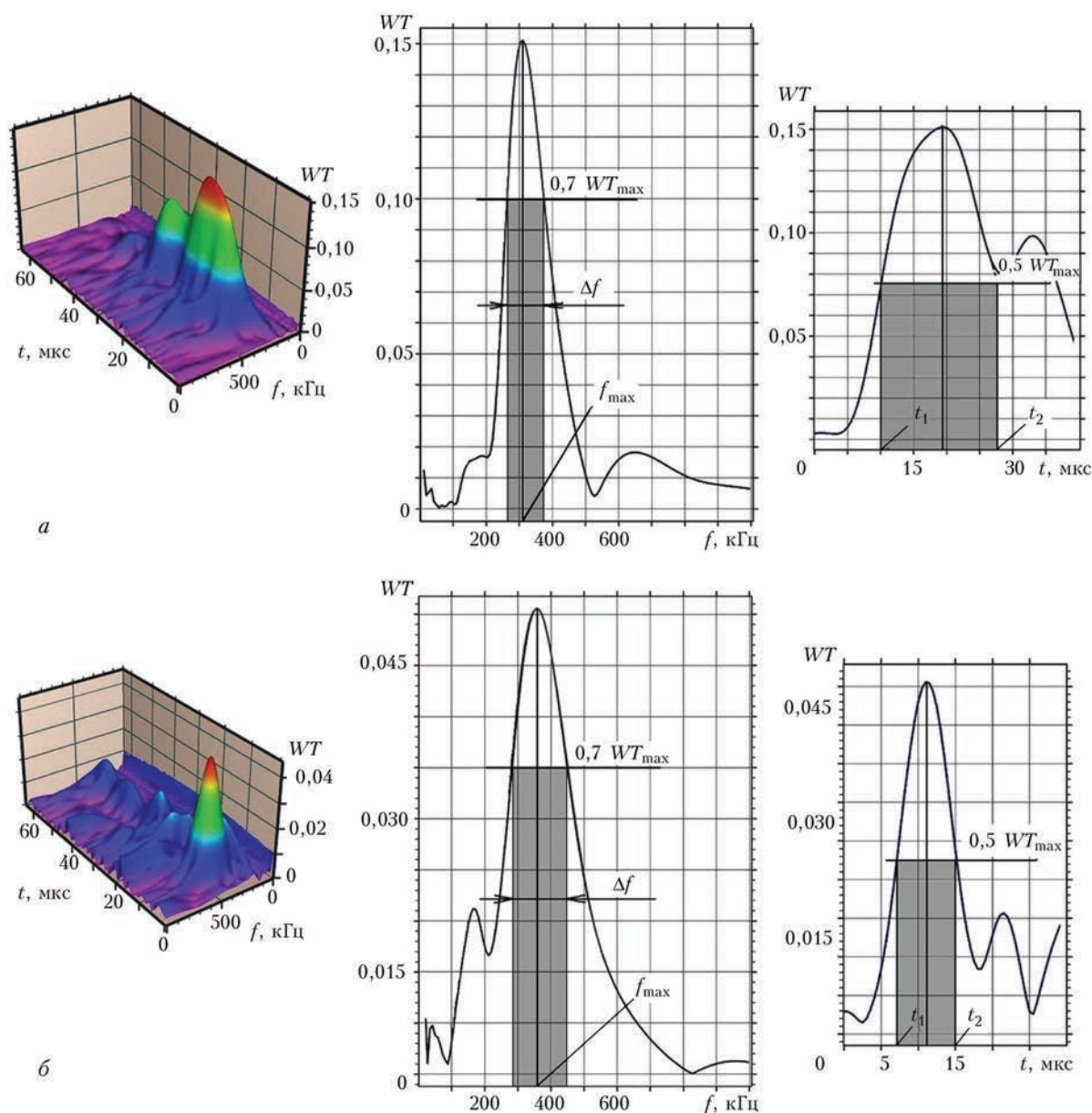


Рис. 4. НВП сигналов АЕ за крихкого (а) та в'язко-крихкого (б) руйнування Protent (3D-зображення; проекції локального імпульсу на площину «WT–f» та «WT–t» у момент досягнення WT_{max})

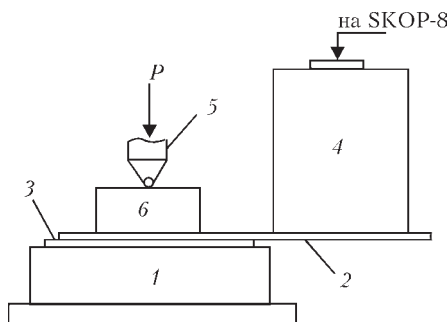


Рис. 5. Структурна схема випробувань на стиск матеріалів ендокоронок (опис 1–6 див. у тексті)

На рис. 6 зображено типові часові зміни максимальних контактних напружень та АЕ-активності за час проведення експерименту для зразків із матеріалів для ендокоронок. Із графіків бачимо, що найшвидше зруйнувався зразок зі стоматологічного композиту, а найбільші контактні напружен-

Таблиця 2. Пружні характеристики стоматологічних матеріалів [27]

Матеріал	Модуль пружності E_2 , ГПа	Коефіцієнт Пуассона ν_2
Прескераміка, металокераміка	68,9	0,33
Стоматологічний композит	16	0,30

ня виникали в зразку з прескераміки. Найменша АЕ-активність була в зразку зі стоматологічного композиту. Під час стиску металокераміки відбувалось генерування більшої кількості сигналів АЕ, ніж під час стиску інших матеріалів.

На рис. 7 зображено розподіл локальних імпульсів, які відповідають різним типам руйнування матеріалів, згідно з енергетичним критерієм ідентифікування. Бачимо, що сигнали АЕ під

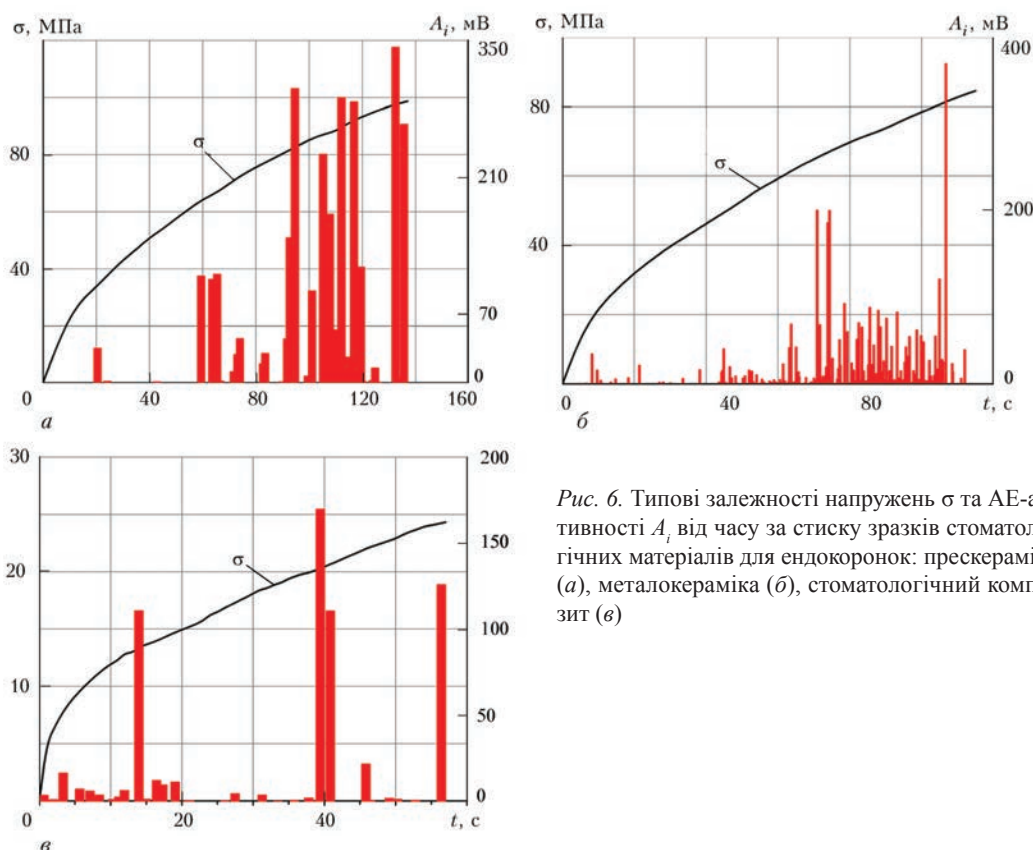


Рис. 6. Типові залежності напружень σ та АЕ-активності A_i від часу за стиску зразків стоматологічних матеріалів для ендокоронки: прескераміка (а), металокераміка (б), стоматологічний композит (в)

час руйнування зразків із прескераміки характеризують крихке руйнування, тобто зі зростанням напружень у зразку відбувається, очевидно, утворення нових макродефектів.

Наявність металевої основи у зразках метало-кераміки призводить до того, що під дією навантаження в них можуть виникати значні пружні деформації. Водночас за результатами ідентифікування типів руйнування за запропонованою методикою можна стверджувати, що під час навантаження стиском зразків із металокераміки руйнування відбувається внаслідок інтенсивного мікротріщиноутворення та подальшого поширення макротріщин у зразку (крихке руйнування), хоча присутня також і незначна пластична деформація. Руйнування стоматологічного композиту розпочиналось майже відразу після прикладення навантаження і характеризувалось чергуванням механізмів мікротріщиноутворення та крихкого руйнування.

Отримані результати добре корелюють із результатами праці [28], де встановили типи руйнування стоматологічних реставраційних матеріалів (амальгаму та армованого керамікою цементу) на основі мікроскопічних досліджень їх поверхонь руйнування. Автори виділили три типи руйнування: радіальне поширення тріщин; конусне розтріскування, яке починається з зони навантаження; підповерхнева пластична деформація.

На рис. 8 зображено фото доломів зразків стоматологічних матеріалів. Зразки з прескераміки

розтріскувались переважно на 2...5 майже однакових частин із практично гладкими поверхнями, паралельними до осі прикладання навантаження (рис. 8, а). Особливістю руйнування зразків із металокераміки та стоматологічного композиту було їх розділення на кілька частин різних розмірів із поширенням тріщин у різних (паралельних та не-паралельних) напрямках відносно осі прикладання навантаження (рис. 8, б, в). Окрім того, в зразках із металокераміки відбувалось відшарування кераміки від металевої основи. Аналогічний вигляд поверхонь руйнування стоматологічних матеріалів отримали в праці [28].

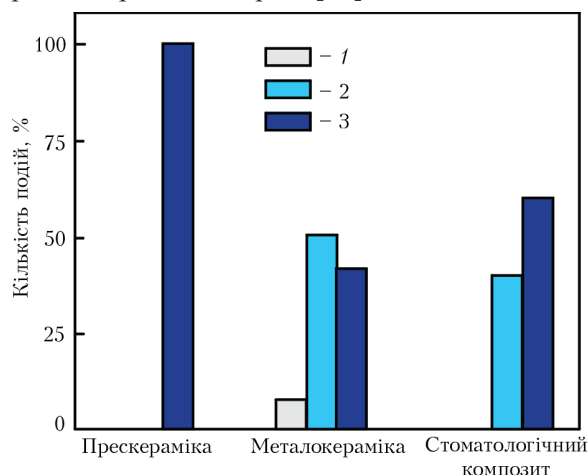


Рис. 7. Розподіл локальних імпульсів, які відповідають різним типам руйнування стоматологічних матеріалів для ендокоронки: 1 – пластична деформація; 2 – мікророзтріскування; 3 – крихке руйнування

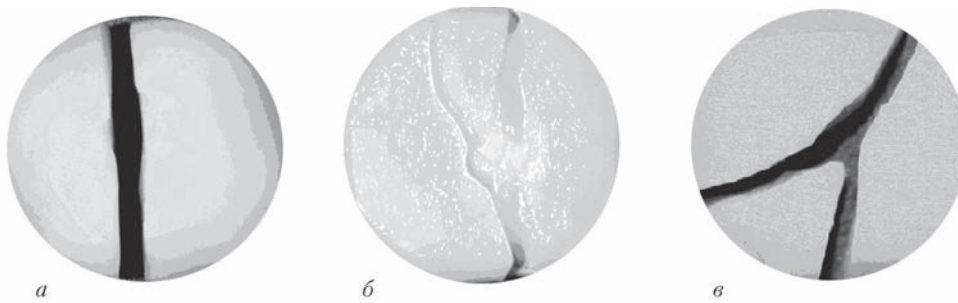


Рис. 8. Вигляд доломів зразків стоматологічних матеріалів: а – прескераміка; б – металокераміка; в – стоматологічний композит

Висновки

Для вивчення динаміки та ідентифікування типів руйнування стоматологічних матеріалів ефективним засобом слугує неперервне вейвлет-перетворення сигналів АЕ. Побудований на його основі енергетичний критерій дав можливість здійснювати оперативне розділення типів руйнування в реальному масштабі часу.

Експерименти показали, що навіть крихке руйнування досліджуваних матеріалів супроводжується мікропластичними актами, що підтверджується генеруванням відповідних сигналів АЕ, які просто розрізнити за енергетичним критерієм і поставити їм у відповідність тип руйнування.

Отже, за результатами проведених досліджень встановлено, що для обох різних за природою видів стоматологічних матеріалів спільною ознакою є чергування в'язкого та в'язко-крихкого руйнування з крихким протягом всього часу навантаження зразків.

Список літератури

- O'Brien W. J. (ed. by) (2008) Dental materials and their selection. 4-th ed. Quintessence Publ. Co, Inc.
- Scherrer S. S., Wiskott A. H., Coto-Hunziker Vol. et al. (2003) Monotonic flexure and fatigue strength of composites for provisional and definitive restorations. *J. of Prosthetic Dentistry*, 89, 6, 579–588.
- Balkenhol M., Ferger P., Mautner M. C. et al. (2007) Provisional crown and fixed partial denture materials: mechanical properties and degree of conversion. *Dental Materials*, 23, 1574–1583.
- Kim S. H., Watts D. C. (2007) In vitro study of edge-strength of provisional polymer-based crown and fixed partial denture materials. *Ibid*, 23, 12, 1570–1573.
- Kerby R. E., Knobloch L. A., Sharples S., Peregrina A. (2013) Mechanical properties of urethane and bis-acryl interim resin materials. *J. of Prosthetic Dentistry*, 110, 1, 21–28.
- Albakry M., Guazzato M., Swain M. V. (2003) Biaxial flexural strength, elastic moduli, and X-ray diffraction characterization of three pressable allceramic materials. *Ibid*, 89, 4, 374–380.
- Yoshimura H. N., Gonzaga C. C., Cesar P. F., Miranda Jr. W. G. (2012) Relationship between elastic and mechanical properties of dental ceramics and their index of brittleness. *Ceramics International*, 38(6), 4715–4722.
- Elsaka S. E., Elnaghy A. M. (2016) Mechanical properties of zirconia reinforced lithium silicate glass-ceramic. *Dental Materials*, 32, 7, 908–914.
- Choi N.-S., Gu J.-U., Arakawa K. (2011) Acoustic emission characterization of the marginal disintegration of dental restoration. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 6, 604–611.
- Скальський В. Р., Макеев В. Ф., Станкевич О. М. та ін. (2014) Чергування типів руйнування стоматологічних полімерів на різних стадіях розвитку тріщини. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 6, 60–66.

- Скальський В. Р., Макеев В. Ф., Станкевич О. М. та ін. (2015) Оцінювання міцнісних характеристик стоматологічних полімерів за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії. *Проблеми прочності*, 4, 67–74.
- Станкевич О. М. (2015) Застосування вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії для оцінювання макроруйнування конструкційних матеріалів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 36–44.
- Kim K.-H., Park J.-H., Imai Y., Kishi T. (1991) Fracture toughness and acoustic emission behavior of dental composite resins. *Engineering Fracture Mechanics*, 40(415), 811–819.
- Lin C.-L., Kuo W.-C., Yu J.-J., Huang S.-F. (2013) Examination of ceramic restorative material interfacial debonding using acoustic emission and optical coherence tomography. *Dental Materials*, 29, 382–388.
- Yi Y.-J., Kelly J. R. (2011) Failure responses of a dental porcelain having three surface treatments under three stressing conditions. *Ibid*, 27, 1252–1258.
- Liu X., Li H., Li J. et al. (2013) An acoustic emission study on interfacial debonding in composite restorations. *Ibid*, 29, 382–388.
- Yang B., Guo J., Huang Q. et al. (2016) Acoustic properties of interfacial debonding and their relationship with shrinkage stress in Class-I restorations. *Ibid*, 32, 742–748.
- Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Станкевич О. М. (2014) Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів. Київ, Наукова думка.
- Daubechies I. (1992) *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, SIAM.
- Vallen Systeme: *The Acoustic Emission Company* [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/products/software/wavelet>. Title from screen (12.02.2017).
- Stankevych O., Skalsky V. (2016) Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 164, 24–34.
- Назарчук З. Т., Скальський В. Р. (2009) Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. У 3 т. Т. 3. *Засоби та застосування методу акустичної емісії*. Київ, Наукова думка.
- Nazarchuk Z., Skalskyi V., Serhiyenko O. (2017) *Acoustic Emission. Methodology and Application*. Springer International Publishing AG, XIV.
- Stankevych O., Skalsky V. (2017) The vibration of a half-space due to a buried mode I crack opening. *Wave Motion*, 72, 142–153.
- Pilkey W. D. (2005) *Formulas for Stress, Strain, And Structural matrices*. 2-nd ed. John Wiley&Sons.
- Сталь марки ШХ15 [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/SHX15. Название с экрана (05.06.17).
- Santos A. F., Meira J. B., Tanaka C. B. et al. (2010) Can Fiber Posts Increase Root Stresses and Reduce Fracture? *J. of Dental Research*, 89, 6, 587–591.
- Wang Y., Darvell B. W. (2007) Failure mode of dental restorative materials under Hertzian indentation. *Dental Materials*, 23, 1236–1244.

References

- (2008) *Dental materials and their selection*. Ed. by W.J. O'Brien. 4th Ed. Quintessence Publ. Co., Inc.

2. Scherrer, S.S., Wiskott, A.H., Coto-Hunziker Vol. et al. (2003) Monotonic flexure and fatigue strength of composites for provisional and definitive restorations. *J. of Prosthetic Dentistry*, 89(6), 579-588.
3. Balkenhol, M., Ferger, P., Mautner, M.C. et al. (2007) Provisional crown and fixed partial denture materials: Mechanical properties and degree of conversion. *Dental Materials*, 23, 1574-1583.
4. Kim, S.H., Watts, D.C. (2007) In vitro study of edge-strength of provisional polymer-based crown and fixed partial denture materials. *Ibid.*, 23(12), 1570-1573.
5. Kerby, R.E., Knobloch, L.A., Sharples, S. et al. (2013) Mechanical properties of urethane and bis-acryl interim resin materials. *J. of Prosthetic Dentistry*, 110(1), 21-28.
6. Albakry, M., Guazzato, M., Swain, M.V. (2003) Biaxial flexural strength, elastic moduli and X-ray diffraction characterization of three pressable allceramic materials. *Ibid.*, 89(4), 374-380.
7. Yoshimura, H.N., Gonzaga, C.C., Cesar, P.F. et al. (2012) Relationship between elastic and mechanical properties of dental ceramics and their index of brittleness. *Ceramics International*, 38(6), 4715-4722.
8. Elsaka, S.E., Elnaghy, A.M. (2016) Mechanical properties of zirconia reinforced lithium silicate glass-ceramic. *Dental Materials*, 32(7), 908-914.
9. Choi, N.-S., Gu, J.-U., Arakawa, K. (2011) Acoustic emission characterization of the marginal disintegration of dental restoration. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), 604-611.
10. Skalsky, V. R., Makeev, V. F., Stankevich, O. M. et al. (2014) Alternation of types of fractures of dental polymers at different stages of crack propagation. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, 6, 60-66 [in Ukrainian].
11. Skalsky, V. R., Makeev, V. F., Stankevich, O. M. et al. (2015) Evaluation of strength characteristics of dental polymers by wavelet transform of acoustic emission signals. *Problemy Prochnosti*, 4, 67-74 [in Ukrainian].
12. Stankevich, O. M. (2015) Application of wavelet transform of acoustic emission signals for evaluation of macrofracture of structural materials. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 36-44 [in Ukrainian].
13. Kim, K.-H., Park, J.-H., Imai, Y. et al. (1991) Fracture toughness and acoustic emission behavior of dental composite resins. *Engineering Fracture Mechanics*, 40(415), 811-819.
14. Lin, C.-L., Kuo, W.-C., Yu, J.-J. et al. (2013) Examination of ceramic restorative material interfacial debonding using acoustic emission and optical coherence tomography. *Dental Materials*, 29, 382-388.
15. Yi, Y.-I., Kelly, J.R. (2011) Failure responses of a dental porcelain having three surface treatments under three stressing conditions. *Ibid.*, 27, 1252-1258.
16. Liu, X., Li, H., Li, J. et al. (2013) An acoustic emission study on interfacial debonding in composite restorations. *Ibid.*, 29, 382-388.
17. Yang, B., Guo, J., Huang, Q. et al. (2016) Acoustic properties of interfacial debonding and their relationship with shrinkage stress in Class-I restorations. *Ibid.*, 32, 742-748.
18. Skalsky V. R., Bozhidarnik, V. V., Stankevich, O. M. (2014) *Acoustic emission diagnostics of types of microfracture of structural materials*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
19. Daubechies, I. (1992) *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, SIAM.
20. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company [Virtual Resource]: URL: <http://www.vallen.de/products/software/wavelet>. Title from screen (12.02.2017).
21. Stankevych, O., Skalsky, V. (2016) Investigation and identification of fracture types of structural materials by means of acoustic emission analysis. *Engineering Fracture Mechanics*, 164, 24-34.
22. Nazarchuk, Z. T., Skalsky, V. R. (2009) Acoustic emission diagnostics of structure elements. Vol. 3: *Means and application of acoustic emission method*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
23. Nazarchuk, Z., Skalsky, V., Serhienko, O. (2017) Acoustic emission. *Methodology and application*. Springer International Publishing AG, XIV.
24. Stankevych, O., Skalsky, V. (2017) The vibration of a half-space due to a buried mode I crack opening. *Wave Motion*, 72, 142-153.
25. Pilkey, W.D. (2005) *Formulas for stress, strain and structural matrices*. 2nd Ed. John Wiley & Sons.
26. Steel of ShKh15 grade. URL: http://metallicheskij-portal.ru/mar-ki_metallov/stk/SHX15. Title from screen (05.06.17) [in Russian].
27. Santos, A.F., Meira, J.B., Tanaka, C.B. et al. (2010) Can fiber posts increase root stresses and reduce fracture? *J. of Dental Research*, 89(6), 587-591.
28. Wang, Y., Darvell, B.W. (2007) Failure mode of dental restorative materials under Hertzian indentation. *Dental Materials*, 23, 1236-1244.

В. Р. СКАЛЬСКИЙ¹, В. Ф. МАКЕЕВ², Е. М. СТАНКЕВИЧ¹,
А. С. КИРМАНОВ²

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

²Львовский нац. ун-т им. Данила Галицкого. 79010, г. Львов, ул. Пекарская, 69. E-mail: ort_stom@meduniv.lviv.ua

АЭ-ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ РЕСТАВРАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены особенности разрушения различных типов стоматологических материалов для временных ортопедических конструкций и эндокоронки при растяжении и сжатии, соответственно. Для анализа сигналов акустической эмиссии использовали непрерывное вейвлет-преобразование. По энергетическому критерию установили распределение характерных типов макроразрушения для каждого материала. Результаты исследований коррелируют с литературными данными. Установлено, что для обоих видов различных по природе стоматологических материалов общим признаком является чередование вязкого и вязко-хрупкого разрушения с хрупким в течение всего времени нагружения образцов. Библиогр. 28, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: стоматологические материалы, разрушение, акустическая эмиссия, вейвлет-преобразование, энергетический критерий

V. R. SKALSKY¹, V. F. MAKEEV², O. M. STANKEVICH¹,
O. S. KIRMANOV²

¹G. V. Karpenko Physical-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: skalsky.v@gmail.com

²Danylo Halytsky Lviv National Medical University, 69, Pekarska str., 79010, Lviv, Ukraine,
E-mail: ort_stom@meduniv.lviv.ua

AE-DIAGNOSTICS OF FRACTURE OF DENTAL RESTORATION MATERIALS

The features of fracture of different types of dental materials for temporary orthopedic structures and endocrowns under tensile and compression loads, respectively, were considered. For the analysis of acoustic emission signals, a continuous wavelet transformation was used. According to the energy criterion, the distribution of typical types of macro-fracture for each material was established. The results of investigations are correlated with those known in the literature. It was established that for both types of dental materials of different nature, a common feature is the alternation of viscous and viscous-brittle fracture with a brittle one throughout the entire time of loading the specimens. 28 – Ref., 2 – Tab., 8 – Fig.

Key words: dental materials, fracture, acoustic emission, wavelet transformation, energy criterion

Поступила в редакцию 10.08.2017

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В. А. ТРОИЦКИЙ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Многолетняя безаварийная эксплуатация магистральных трубопроводов зависит от мониторинга их технического состояния, уровня обслуживания, реализации результатов физических методов их диагностики. Рассмотрены применяемые виды разметки магистральных трубопроводов, которые должны быть заменены на персональные штрих- и точечные коды труб. Это позволяет объединить информационные возможности различных систем диагностики и вести локальные ремонты без травмирования труб большими раскопами, следить за эксплуатацией труб с дефектами, степень опасности которых должна иметь цветную индикацию. Библиогр. 14, табл. 1, рис. 14.

Ключевые слова: магистральный подземный трубопровод, дефектоскопия, внутритрубая диагностика, мониторинг, измерение поляризационного потенциала, магнитометрический метод, ультразвуковой контроль, учет состояния труб, маркерные и кодовые пластины

Все трубы, из которых состоят трубопроводы, имеют дефекты, не обнаруженные при входном контроле металла листов, из которых формируется труба, и появившиеся при изготовлении и сварке их в трубопровод [1]. Все эти допустимые дефекты присутствуют в каждой трубе в разном количестве.

Факторами, ограничивающими длительность эксплуатации подземных трубопроводов, являются как развивающиеся многочисленные врожденные дефекты, так и процессы стресс-коррозии, деградации материалов, усталостные и электрохимические процессы. Поэтому регулярная диагностика, эффективная организация наблюдения за состоянием труб являются основными мероприятиями по поддержанию работоспособности конкретных труб подземных магистральных трубопроводов.

Количество дефектов, обнаруживаемых только при внутритрубой диагностике линейных участков трубопроводов, может исчисляться сотнями на 1 км. Одновременное их устранение является чрезмерно трудоемкой задачей и не является целесообразным [12]. За дефектными зонами надо следить. Современные методы расчетов оценки предельного состояния трубных конструкций с утонениями, трещинами, измеренными геометрическими аномалиями позволяют с высокой достоверностью прогнозировать их остаточную прочность, определять критические размеры дефектов, требующих немедленного устранения, или умеренные, не требующие немедленного устранения. Точность таких расчетов зависит от особенностей конкретного участка, возраста и сопротивляемости различным видам разрушения. Поэтому всем обнаруженным дефектам должна быть дана пред-

варительная оценка и установлена очередность их устранения. В мировой практике уровень опасности принято обозначать в цвете. Для труб, эксплуатируемых с дефектами, могут быть три цвета: красный, оранжевый, серый. Этим способом можно воспользоваться для ранжирования дефектных зон, обращения внимания служб и лиц, причастных к эксплуатации трубопроводов. Эти цвета должны быть на указателях проблемных зон, на элементах трубопроводной арматуры, подлежащих ремонту конструкций, ожидающих своего часа, на указателях, предусмотренных в технической документации.

В случаях отсрочки устранения обнаруженных дефектов при помощи цветной индикации можно находить эти зоны для наблюдения за ними с определенной периодичностью. Кроме того, независимо от проблем дефектности, для идентификации все трубы (плети, секции) должны иметь свои коды (номера), выведенные на поверхность и читаемые внутритрубами и ручными дефектоскопами. Подобные организационные правила должны быть заложены в технической документации. Надежность реконструируемых и строящихся магистралей требует этих нововведений.

Известно, что трубопроводы внешней прокладки живут дольше, чем подземные трубопроводы. Знаменитый Аляскинский нефтепровод, перекачивающий агрессивную нефть, эксплуатируется уже более 50 лет и при хорошем обслуживании будет это делать еще многие годы. Долголетие зависит от культуры и качества обслуживания. Срок службы подземных нефтегазопроводных магистралей может быть приближен к времени существования наземных трубопроводов, если обеспечить достойный уход за каждой трубой, из которых складывается трубо-

провод. Для этого состояние труб должно проверяться без больших травм для металла, больших механических нагрузок при локальном шурфовании, без больших раскопов. Для этого надо иметь выведенные на поверхность номера труб (плетей, секций).

Для подземных нефте-газопроводных магистралей используется много непрерывно совершенствующихся видов диагностики, число которых непрерывно увеличивается. Наиболее распространенными из них являются: внутри-трубная [3, 4] магнитная (акустическая); низкочастотная [5] ультразвуковая; электрометрическая [6, 7] изоляции; коэрцитивно-метрическая; магнитометрическая [8] на основе магнитной памяти; акустоэмиссионная; тензометрическая; термографическая [5, 4], визуально-оптическая и пр.

Каждое из этих испытаний дает свою специфическую информацию о состоянии подземных трубопроводов, которая воспринимается ремонтниками только после ее подтверждения ручными средствами дефектоскопии. Для уменьшения механических нагрузок шурфление, вскрытие должно производиться только части трубы. К сожалению, в настоящее время по дефектограммам каждого из перечисленных видов диагностики нельзя называть трубу, в которой имеются опасные дефекты, поскольку трубы обезличены, т. е. не имеют своих номеров (кодов). Эта неопределенность порождает много проблем, включая понижение надежности трубопроводов из-за протяженных раскопов, повышение расходов на ремонт и пр.

Все перечисленные выше физические методы технической диагностики имеют собственные точки начала и средства отсчета координат, правила и средства привязки своих результатов к поверхности магистрали. Для этого часто используют устройства систем космической навигации GPS. Поэтому трудно сравнивать результаты разных видов диагностики, тогда как они должны дополнять друг друга. Для каждого вида испытаний всегда остро стоит вопрос ошибок первого (пе-

ребор, лишнее забраковано) и второго (недобор, пропуск дефектоскопии) рода при сравнении результатов всех видов диагностики. Опишем некоторые виды диагностики, уточнить и объединить результаты которых могут только присвоенные трубам собственные номера, зная которые можно наблюдать историю жизни каждой трубы многие десятилетия.

На рис. 1, а показана схема мониторинга состояния изоляции за счет измерения поляризационного потенциала трубопровода [6, 7], используемого для изучения влияния агрессивной среды грунта, которая приводит к разрушению изоляции и металла трубопроводов. Для защиты металла применяют противокоррозионную защиту и периодически ее проверяют. Подземные трубопроводы защищают от коррозии изоляционным покрытием и катодной поляризацией. Основным критерием состояния изоляции считают разницу потенциалов между металлом и средой, называемую поляризационным потенциалом. В электропроводной среде значение потенциала следует контролировать и поддерживать в определенном диапазоне. Для этого используется соответствующая точная электронная аппаратура.

Такое обследование подземных трубопроводов электрометрическими методами (электродами) с поверхности земли может быть контактным (рис. 1, а) и бесконтактным. Последнее существенно повышает оперативность, но не дает уверенной информации. В этом виде диагностики имеется много оригинальных решений. На рис. 1, а показана упрощенная схема измерения поляризационного потенциала [9]. Здесь изображен пункт измерений, электрод, заглубляемый в грунт через 5...15 м по оси трубопровода, и дополнительный электрод, перемещаемый параллельно оси на расстоянии $(2...6)h$. С помощью измерительного пункта с такой комплектацией можно на сотнях метров получать сведения о распределении переходного сопротивления «труба – земля» вдоль трассы (рис. 1, б), измерять сопротивление изоляции, рас-

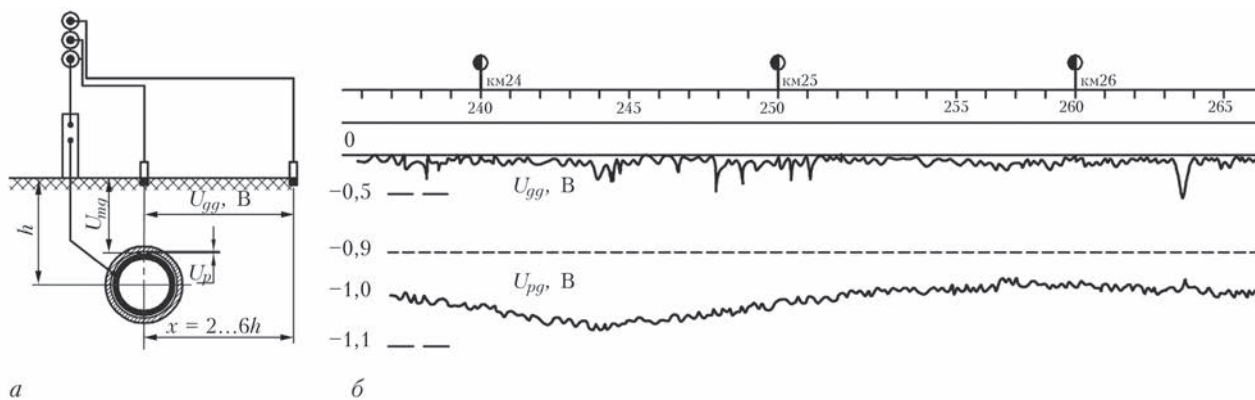


Рис. 1. Оценка качества изоляции трубопровода по результатам измерений поляризационного потенциала U_p ; а – схема, б – результаты измерений, U_{mg} – напряжение между трубой и электродом, U_{gg} – то же на расстоянии x от оси, h – глубина залегания трубопровода

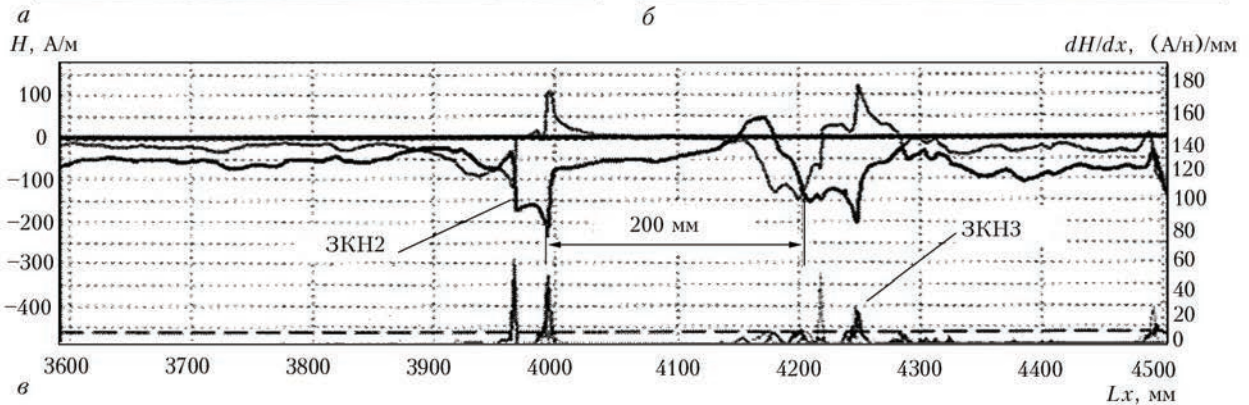


Рис. 2. Магнитометрическая диагностика, определяющая зоны концентраций напряжений (ЗКН): а, б – процесс измерений; в – распределение напряженности H (А/м) магнитного поля на поверхности и его градиент dH/dx вдоль оси магистрали

пределение потенциала «земля – земля» и U_p – поляризационного потенциала вдоль трубы, оценивать состояние изоляции.

Магнитометрический метод (рис. 2) находит зоны концентраций напряжений. В этих зонах при полноценной изоляции могут быть утонения металла и другие дефекты [8]. Здесь магнитограмма, как и результаты измерений поляризационного потенциала, не привязана к конкретным трубам.

На рис. 3 показан пример диагностики магистрального трубопровода с помощью низкочастотного (НЧ) [5, 10] ультразвукового контроля (УЗК). Здесь измерения, отсчет координат идет от места установки кольцевой антенны на теле трубы. Это уже какое-то более конкретное начало отсчета по телу изучаемого объекта. Метод НЧ УЗК на новых

трубопроводах может дать информацию о качестве большого числа кольцевых монтажных швов магистрали до нескольких километров. Такую оценку важно делать перед опусканием трубопровода в траншею. По протяженности проникновения НЧ-колебаний в металл старых труб можно судить об износе его структуры. НЧ УЗК является действующим контролем. Он успешно применяется для диагностики различных трубопроводов, включая Аляскинский нефтепровод.

Интересный опыт применения НЧ УЗК диагностики описан в работе [10]. Этот метод был использован для диагностики 74-х километрового технологического трубопровода. С помощью НЧ УЗК было обнаружено 1345 дефектов с утонением стенки трубы более 20 %. Размер утонения уточнялся УЗ-толщиномерами. При этом было выделено 263 недопустимых дефекта с толщиной стенки меньше браковочного уровня и 230 дефектов с толщиной стенки, близкой к отбраковочному значению (плюс 0,5 мм). Первая группа подлежала немедленному ремонту (красный цвет), вторая – была отнесена к ближайшему плановому ремонту (оранжевый цвет). Остальные 1345 – 263 – 230 = 852 пораженных (более 20 % толщины) места (серый цвет) должны были наблюдаться. Для этого их надо периодически отыскивать на трассах и диагностировать. Очевидно, что каждые из 852 + 230 = 1082 мест на трубо-



Рис. 3. Низкочастотная ультразвуковая диагностика

проводах будут легче обнаруживаться, если ввести нумерацию труб. Для наружных трасс это так и делается. Ниже покажем, как это можно сделать для подземных трубопроводов, с которыми у обходчиков нет непосредственного контакта.

На рис. 4 изображена [10] диаграмма (2011 г.) распределения недопустимых дефектов по-трубно. Здесь отдельные трубы имеют до 21 недопустимого дефекта. По 7 недопустимых дефектов было у трех труб, а по одному – у 25 труб. Характерно, что в 2010 г. эта фирма до освоения метода НЧ УЗК на технологических трубопроводах протяженностью 74,2 км нашла только 9 труб с недопустимыми дефектами, тогда как по данным 2011 года эти трубопроводы имели 1345 дефектных мест. Как для наземных, так и для подземных трубопроводов отчетность должна быть только по-трубная (рис. 4).

Введение по-трубной нумерации обеспечит учет реального состояния каждой трубы с указанием мест расположения дефектов, что продлит срок службы подземных трубопроводов, повысит культуру их обслуживания. При этом каждый вид диагностики получает возможность представлять свои результаты с привязкой к конкретным трубам. Все многочисленные виды оценок состояния магистрали становятся конкретными и сопоставимыми друг с другом. Зонам с дефектами должна быть дана оценка конкретной степени опасности, которую несет конкретная труба с ее биографией и факторами, повлиявшими на развитие в ней стресс-коррозии, случаи дополнительных нагружений, предыдущие ремонты и прочее. По-километровая оценка должна быть заменена по-трубной.

Из всех перечисленных видов диагностики наиболее информативной является внутритрубная. Внутритрубные дефектоскопы непрерывно совершенствуются, растут объемы получаемой от них информации. Неоднородности, утонения и другие отклонения от нормы по рекоменда-

ям диагностов (дефектоскопистов и прочнистов) после расшифровки дефектограмм должны быть указаны соответствующим цветом на конкретной трубе трассы. Сейчас интересующую трубу разыскивают по косвенным признакам, например, по расстоянию от определенного репера, который визуализируется на дефектограмме, или элементам трубной арматуры, отводов, преград и тому подобному, что легко находится на поверхности трассы. Расстояние от репера до интересующей трубы, до места шурфления может исчисляться сотнями метров. Поэтому вероятность допущения ошибки в определении места раскопа очень высока. На старых трубопроводах кроме проблемы «ремонтировать нечего» часто возникает более опасная ситуация – проблема «избыточности». Это происходит, когда ручная дефектоскопия находит намного больше дефектов, чем внутритрубный дефектоскоп. При этом что-то отремонтировали, но не самое опасное по дефектограмме место, которое не было раскопано. Такая ситуация возможна только при обезличенности труб. Из-за противоречий с ручной дефектоскопией, неуверенности приходится вскрывать большие участки трассы. Положение дел исправится, если будет использована описанная ниже считываемая внутритрубным дефектоскопом и ручными средствами система штрихового или точечного кодирования (нумерации) труб.

Для считываемой внутритрубными дефектоскопами разметки магистралей используют системы [11–13], основанные на применении различных на дефектограмме маркерных пластин, располагаемых на теле трубы, реперов, маркерных труб. Маркерные пластины на теле трубы и маркерные трубы облегчают перенос информации с дефектограммы на тело трубы.

В работе [13] описана разметка с помощью накладных маркерных пластин (рис. 5), размещенных вдоль трубопровода на стыковых соединениях отдельных труб, и соответствующих реперов

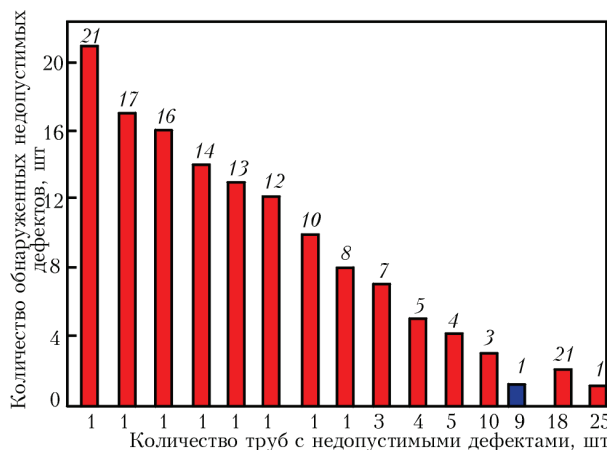


Рис. 4. Диаграмма распределения недопустимых дефектов и количества бракованных труб, шт/трубопроводов (■ – 2010 г., 9 шт., ■ – 2011 г., 263 шт.)

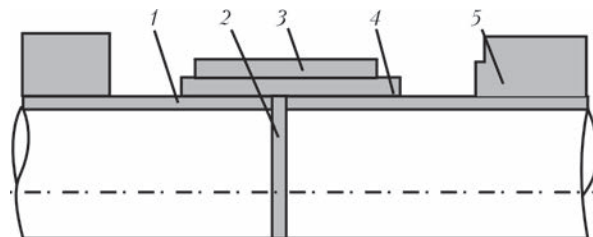


Рис. 5. Расположение маркерных пластин на трубопроводе: 1 – стенка трубы; 2 – кольцевой монтажный стык; 3 – хомут; 4 – маркерная пластина; 5 – бетон

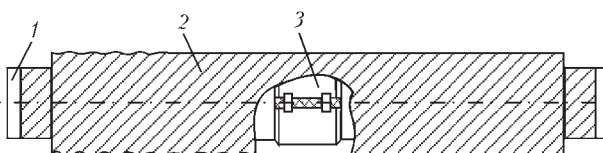


Рис. 6. Маркерная труба: 1 – тело трубы; 2 – балластное покрытие; 3 – маркер KD 13229.00.000

на поверхности трассы. Последним достижением в этой серии разметок является разметка на основе видимых на дефектограмме маркерных труб (рис. 6), изготавливаемых в заводских условиях и располагаемых в магистрали через 1...2 км. Для того, чтобы найти дефектную трубу, перемещаясь по поверхности трассы от репера маркерной трубы, надо отсчитать большие расстояния примерно так, как показано на рис. 2. Сложен перенос информации о расположении дефектов с дефектограммы, которая не учитывает особенности рельефа поверхности трассы. Это является одной из причин ошибок в определении места расположения дефектов на поверхности. Все обнаруженные на дефектограммах дефекты легко найти и указать на поверхности трассы, если будет по-трубная нумерация, вынесенная на поверхность.

В качестве штрих-кодовых элементов в простейшем случае, например для труб малого диаметра, могут быть использованы кодовые бандажи (рис. 7), располагаемые в зоне кольцевого монтажного шва. Для труб больших диаметров штрих-код может быть в виде панели с кодовыми элементами (рис. 8) или пластины с кодовыми отверстиями (рис. 9–13). Таким образом, есть три конструктивные возможности формирования легко считываемого кода трубы. Для каждого монтажного шва трубы может быть сформирована определенная комбинация кодовых элементов. Это могут быть бандажи, кодовые элементы панели или отверстия в пластине. Каждая из этих трех систем имеет свои особенности в изготовлении, считывании, расширении информации.

Преимущество штрих-кодов на основе маркерных бандажей – это пригодность для любых диаметров, абсолютная узнаваемость их внутритручными дефектоскопами, поскольку кодовый бандаж – это заметное утолщение металла по всей образующей трубы, и такой код пропустить нельзя.

Маркерные бандажи (фиг. 7), располагаемые в зоне кольцевого монтажного сварного шва перед его изоляцией, изготавливаются из элементов трубного металла и плотно прилегают к поверхности трубы. Они бывают многоэлементные или ленточные.

В качестве информативных признаков штрих-кода может быть также форма, конструкция элементов бандажа, расстояние его до монтажного шва, расстояние между отдельными элементами бандажей. Используя эти признаки, можно обозначить многие сотни стыков.

Если такой штрих-код делать только на каждый пятый стык, т. е. через 4 трубы, то тогда для участка из 100 труб (1200 м) необходимо разметить только 20 стыков. В этом случае оценка дефектов, их опасность и расположение должно выполняться для блока из четырех труб.

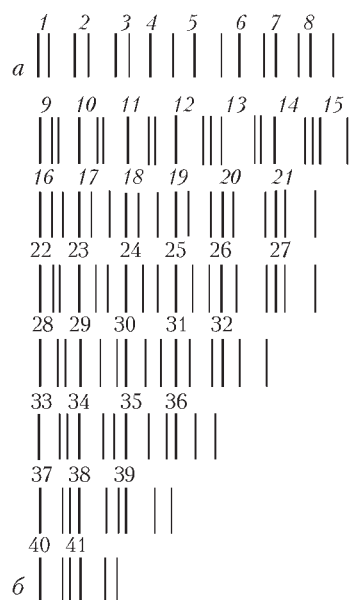


Рис. 7. Формирование штрих-кода за счет удаления одного (а) или двух (б) бандажей (тонкая линия) от монтажного шва (жирная линия)

На рис. 7, а показано, как одиночный ленточный бандаж располагается около монтажного шва (МШ) на разных расстояниях. Здесь так обозначено 8 монтажных швов, выделенных на рисунке жирными линиями. Тонкая линия – это ленточный или сборный кодовый бандаж, расположенный справа от МШ. Набор штрих-кодов может быть сформирован при расположении подобных бандажей и слева от МШ, т. е. по ходу или против направления движения транспортируемого продукта.

На рис. 7, б показана разметка МШ, аналогичная разметке рис. 7, а, но с помощью уже двух бандажей. Здесь за счет расстояния между бандажами и МШ число обозначений существенно увеличено. На рис. 7, б их показано 33, а общее число штрих-кодов на рис. 7 составит 41. На рисунке одноленточный и двухленточный бандажи находятся справа от МШ. Такое же их расположение может быть выполнено слева от МШ. Тогда общее число штрих-кодов возрастает до 82. Это при длине трубы 12 м позволит обозначить каждую трубу на трассе, протяженностью 984 м. Значительно больше возможностей в формировании штрих-кодов дают не ленточные, а многозвенные сборные бандажи. На рис. 7 показано использование только двух признаков – числа (2) и расстояния. Если, кроме того, ввести учет вариантов конструктивного исполнения штрихового элемента (рис. 8), то число кодов возрастает на порядок.

Формирование штрих-кодов должно быть описано в технической документации, где должны быть указаны соответствующие друг другу коды и номера труб (МШ) в виде таблиц, подобных таблице, подготовленной для точечного штрих-кода с двумя отверстиями из 15 возможных.

Для труб большого диаметра рекомендуются штрих-кодовые панели (рис. 8), в которых короткие прямые кодовые элементы являются аналогами бандажей.

Рассчитаем сколько вариантов штрих-кода можно получить, когда имеется: 5 и 10 вариантов конструкций элементов, которые могут располагаться вплотную к МШ или на некотором расстоянии (2 признака). Маркерные элементы (бандажи) могут располагаться либо до либо после МШ (2 признака).

Таким образом, в случае 5 вариантов конструкций элементов (бандажей) будет 9 отличительных варьируемых признаков, а в случае 10 вариантов таких признаков будет 14. Подсчитаем число комбинаций (число кодов) для этих случаев: $A_9^3 = 9 \cdot 8 \cdot 7 = 504$, $A_{14}^3 = 14 \cdot 13 \cdot 12 = 2184$. Это приблизительно на протяжении 5 км и 22 км трассы даст всем трубам возможность иметь собственные неповторяющиеся коды.

Здесь для расчета комбинаций использована известная формула $A_m^n = m(m-1)(m-2) \dots [m-(n-1)]$, где число размещений равно произведению n последовательных целых чисел, из которых наибольшим является m .

На рис. 8 приведен пример такой кодовой панели, состоящей из пяти кодовых элементов. Панель представляет набор кодовых элементов, собранных на шпильках с втулками, определяющими дистанцию между штриховыми элементами. Изменяя набор, конструкцию элементов и дистанцию между ними, формируются коды, подобные штрих-кодам из бандажей, изображенных на рис. 7. Система нумерации может начинаться с использования одного элемента, далее двух, трех однотипных, далее – разных штриховых элементов. Кодовую панель располагают в околосшовной зоне монтажного шва перед ее изоляцией.

В состав штрих-кодовой панели по рис. 8 кроме набора кодовых элементов входят вспомогательные детали: две щеки, втулки и три стягивающие шпильки, которые для того, чтобы их не было видно на дефектограмме, должны быть выполнены из неферромагнитного металла, должны иметь толщину, диаметры и другие размеры меньше размеров штриховых кодовых элементов. При выполнении этих условий на дефектограмме будут четко видны только штрих-кодовые элементы без вспомогательных деталей.

В каждой группе информационных кодовых элементов должна быть иерархия применимости с учетом читабельности их на дефектограмме. Если прочтение штрих-кодов зависит от направления намагничивания, то для выявления точечных кодов направление намагничивания не имеет значения. Рассмотрим возможности точечных кодов.

На рис. 9 показано расположение точечной кодовой пластины 1 в зоне пересечения кольцевого

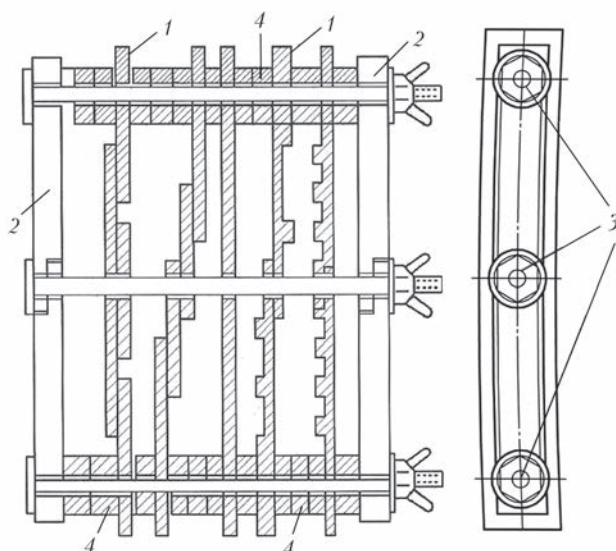


Рис. 8. Панель штрих-кодов, состоящая из 5 разных кодовых элементов, сочетание которых определяет номер трубы: 1 – кодовые элементы; 2 – щеки; 3 – стягивающие шпильки; 4 – втулки

монтажного 2 и продольного 3 швов. Вариантов точечных кодов, их конструктивного и смыслового наполнения может быть очень много. Опишем четыре принципиально разные системы построения точечных кодовых обозначений. Все они предполагают наличие ферромагнитной пластины с отверстиями, располагаемой на теле трубы.

В мировой практике кодирования штриховые коды вытесняются точечными, которые проще изготавливать и понимать. Самый простой точечный код – это когда количество отверстий в пластине равно номеру без каких-либо комбинаций (рис. 10). Сколько отверстий, такой и номер. Все просто. Это простейшая возможность формирования номеров. На рис. 11 показан более сложный вариант написания цифрового номера. Отверстия в пластине на рис. 10 могут быть выполнены в произвольном порядке, а на маркерной пластине по рис. 11 изображен цифровой номер, который принадлежит трубе № 9175. И в первом и во втором вариантах надо иметь много отверстий.

Покажем, что выполняя в пластинах только 2 – 3 отверстия за счет комбинаций относительно возможных мест их открытия, можно создавать огромное количество кодов. Многочисленность точечных кодов достигается за счет разного

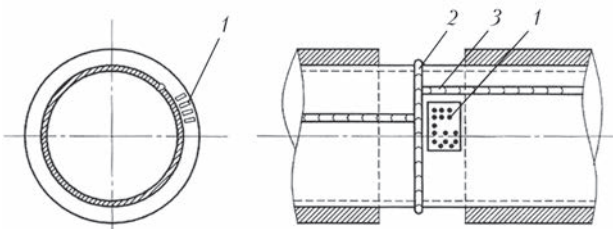


Рис. 9. Расположение кодовой пластины (1) в зоне пересечения монтажного (2) и продольного (3) швов

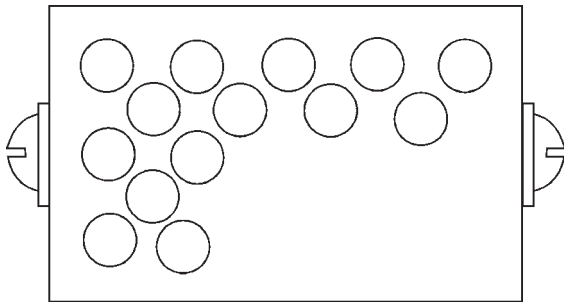


Рис. 10. Маркерная пластина с 14 произвольно расположенными отверстиями, число которых соответствует номеру монтажного шва (№ 14)

расположения нескольких отверстий относительно детерминированных точек их возможного расположения.

На рис. 12 показана небольшая пластина, содержащая 15 детерминированных точек, в которых могут быть открыты отверстия. С помощью такой пластины, открывая в детерминированной точке по одному отверстию, можно получить 15 обозначений, а при открывании двух одинаковых отверстий можно получить уже 105 кодов, показанных в таблице. Если на этой кодовой пластине отверстия имеют собственные отличительные признаки, например разные диаметры, то число таких кодов удваивается и делается равным 210. Общее число вариантов из 15 по два подсчитывается по формуле $N = A_m^n = m(m-1) \dots = A_{15}^2 = 210$. Здесь каждая пластина имеет два разных отверстия.

В том случае, если оба отверстия одного диаметра, т. е. не имеют собственных отличительных признаков, то число кодов уменьшается в два раза и равно $N = \frac{A_m^n}{n} = 105$. Они приведены в таблице. Например, для обозначения МШ, имеющего номер 47, согласно таблице, на кодовой панели

Соответствие номерам труб точечного кода в виде двух одинаковых отверстий на пластине с 15-ю возможными точками для отверстий

Номер МШ	$\emptyset n_1-n_2$	№	$\emptyset n_1-n_2$	№ МШ	$\emptyset n_1-n_2$	№ МШ	$\emptyset n_1-n_2$	№ МШ	$\emptyset n_1-n_2$	№ МШ	$\emptyset n_1-n_2$	№ МШ	$\emptyset n_1-n_2$
1	1-2	17	2-5	33	3-9	49	4-14	65	6-11	81	8-12	97	11-13
2	1-3	18	2-6	34	3-10	50	4-15	66	6-12	82	8-13	98	11-14
3	1-4	19	2-7	35	3-11	51	5-6	67	6-13	83	8-14	99	11-15
4	1-5	20	2-8	36	3-12	52	5-7	68	6-14	84	8-15	100	12-13
5	1-6	21	2-9	37	3-13	53	5-8	69	6-15	85	9-10	101	12-14
6	1-7	22	2-10	38	3-14	54	5-9	70	7-8	86	9-11	102	12-15
7	1-8	23	2-11	39	3-15	55	5-10	71	7-9	87	9-12	103	13-14
8	1-9	24	2-12	40	4-5	56	5-11	72	7-10	88	9-13	104	13-15
9	1-10	25	2-13	41	4-6	57	5-12	73	7-11	89	9-14	105	14-15
10	1-11	26	2-14	42	4-7	58	5-13	74	7-12	90	9-15		
11	1-12	27	2-15	43	4-8	59	5-14	75	7-13	91	10-11		
12	1-13	28	3-4	44	4-9	60	5-15	76	7-14	92	10-12		
13	1-14	29	3-5	45	4-10	61	6-7	77	7-15	93	10-13		
14	1-15	30	3-6	46	4-11	62	6-8	78	8-9	94	10-14		
15	2-3	31	3-7	47	4-12	63	6-9	79	8-10	95	10-15		
16	2-4	32	3-8	48	4-13	64	6-10	80	8-11	96	11-12		

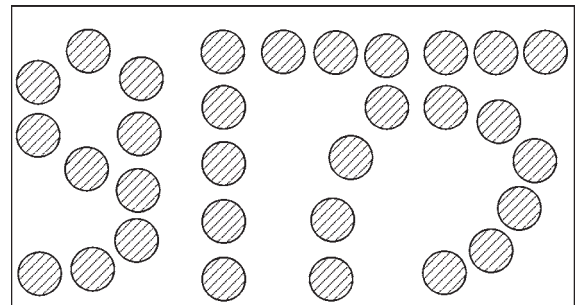


Рис. 11. Маркерная пластина, содержащая 55 точек, с цифровым номером из 31 отверстия для трубы № 9175

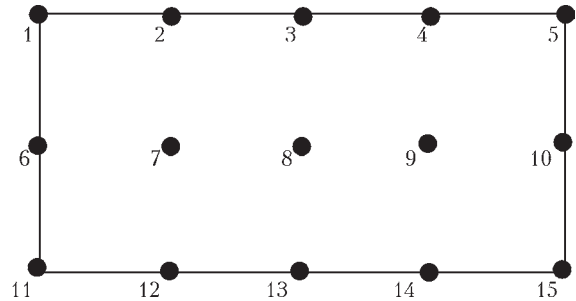


Рис. 12. Кодовая пластина на 15 возможных отверстий для 105 или 210 точечных кодов

должны быть открыты четвертое и двенадцатое отверстия.

На рис. 13 показана кодовая пластина в два раза большего размера, чем на рис. 12, в которой детерминированных точек для отверстий в два раза больше (30). Причем отверстия могут быть разных и равных диаметров. Если в такой пластине открывать только по одному отверстию одного диаметра, то так можно обозначить только $N_1^1 = 30$ МШ, а если открывать по два отверстия (рис. 13, б) одного диаметра, то число кодов будет $N = A_{30}^2 = 435$. Если открывать два отверстия разного диаметра, то $N_{30}^2 = A_{30}^2 = 870$. Если аналогично открывать по три отверстия (рис. 13, в) разных

диаметров, то число кодов будет $N_{30}^3 = 24360$. Это уже слишком много. Так можно обозначить все трубы в магистрали протяженностью $24360 \times 12 = 292320$ м т. е. примерно 300 км. Для облегчения понимания использования точечных кодов избыточность возможностей желательно уменьшить, например, все отверстия делать одного диаметра. Тогда $N_1 = 30$; $N_2 = 435$; $N_3 = 8120$ (примерно 97 км).

Как видно из этих цифр, система точечных кодов с количеством открываемых отверстий более 3 для трубных задач уже избыточна. С расширением возможностей усложняется понимание точечных кодов. Лучше сделать акцент на периодической повторяемости простых кодов с одним или двумя штриховыми элементами или одним или двумя отверстиями после естественного артефакта магистрали.

Добавить информативности можно простыми вспомогательными возможностями. Например, введением прорезей, показанных на верхней кромке кодовой пластины (рис. 13, а), или изменением детерминированного места расположения кода, что также является легким для понимания отличительным признаком.

Таким образом, из трех рассмотренных систем простейшими являются точечные коды на основе отверстий в кодовой пластине, которые могут быть в следующих исполнениях: произвольно расположенные отверстия (рис. 10, б), количество которых определяет номер; цифровое изображение (рис. 11) в виде арабских (1, 2, 3. ...) или римских (I, II, III, ...) цифр; комбинации 2-х или 3-х отверстий (рис. 13, б, 13, в); посредством одного кодового отверстия, местоположение которого определяет номер (рис. 13, а).

Пока нет стандартов, требующих применения по-трубного кодирования, проектант имеет возможность разработки собственных систем нумерации. Он может выбирать одну из четырех перечисленных точечных кодовых систем с учетом особенностей ожидаемого строительства или реконструкции.

Самый упрощенный и достаточно емкий способ предполагает открытие по одному отверстию разного диаметра и использование ряда прорезей на периферии пластины. На рис. 13, а показаны два возможных диаметра и семь прорезей по верхней периферии кодовой пластины. Боковые прорези, количество которых соответствует номеру участка трубопровода, являются вспомогательным информативным признаком и могут быть использованы для дополнительного обозначения огромного количества труб.

По-трубная разметка важна как для подземных, так и для подводных трубопроводов, в зонах активных грунтов, включая зоны тектонических разломов, горных местностей, где надо следить за напряженным состоянием трубопровода, его подвижностью. Специфика среды пролегания трубопроводов определяет способы выведения на поверхность номеров (кодов) для периодической инспекции, наблюдения за отдельными трубами.

Требования к системам разметки подземных трубопроводов будут возрастать с ростом культуры эксплуатации. По-трубная разметка облегчит преодоление спорных ситуаций, возникающих периодически на подземных трубопроводах в течение многолетнего периода их эксплуатации, для которых практикуют различные виды диагностики (рис. 1–3). Так может быть обеспечено наблюдение за каждой трубой, которая была или должна быть в ремонте, но ждет своей очереди. Без вскрытия магистрали все потенциально опасные дефекты, обнаруженные внутритрубно дефектоскопом, могут быть обозначены на поверхности трассы. Так может быть реализован принцип предупреждения и устранения очередности ремонта по степени опасности дефектов (красная, оранжевая, серая). Вынесенный на поверхность трассы цвет определяет отношение к конкретной трубе с дефектом.

Система кодирования (нумерации) труб, изложенная в технической документации, сократит эксплуатационные расходы, время для профилактики и наблюдения за отдельными трубами, их ремонт, будет способствовать сокращению объемов земляных работ.

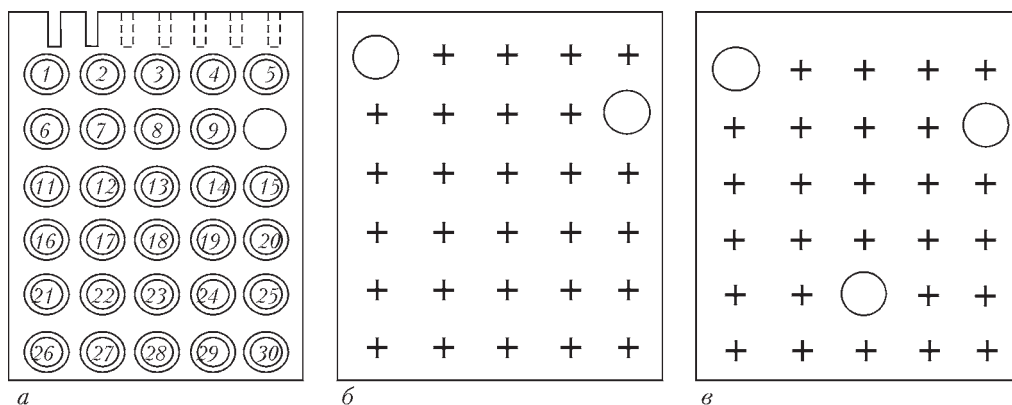


Рис. 13. Кодовая пластина: а – с одним (10) открытым отверстием из 30 возможных и 7-ю возможными прорезами по периферии; б – с двумя и в – с тремя открываемыми отверстиями

Достаточное упрощенное емкое кодирование может быть достигнуто с помощью всего двух или трех отверстий, двух или трех штрих-кодовых элементов. Трубы с отклонениями от нормы должны периодически наблюдаться различными средствами неразрушающего контроля путем точечного шурфования без травмирования соседних полноценных зон трубопровода. Точное место расположения дефекта на конкретной трубе легко находится на ее дефектограмме и должно быть выведено на поверхность вместе с ее номером. Цифровой номер и цвет легко читается обходчиками. Штриховой или точечный код читается приборами и специалистами, знающими техническую документацию и переводные таблицы. Для обходчиков, диагностов и остального персонала, перемещающегося по поверхности трассы, должны быть понятны номера труб и степень (цвета) опасности дефектов, которые они имеют. Таким образом, будет стерто одно из основных информационных отличий в эксплуатации подземных и наземных магистралей. Они будут меньше травмироваться, так как уменьшатся объемы раскопов.

По данным работы [14] наибольшая доля аварий (69 %) на подземных трубопроводах связана с внешними механическими воздействиями. В США 26,1 % аварий происходит от воздействия машин и механизмов. Механические нагрузки создаются и несанкционированными врезками, для борьбы с которыми разрабатываются сложные автоматизированные системы быстрых упреждающих действий. Любые быстрые действия могут быть только при точном указании места происхождения несанкционированных звуков (шумов от механизмов, используемых при врезках).

Для вывода по-трубной разметки на поверхность должно быть использовано все, что расположено вдоль трассы. Это пикеты, измерительные пункты, по-километровые и промежуточные столбы, вехи, пересекающие трассу внешние коммуникации, специальные указатели и тому подобное. Особое значение имеют разметки (красный, оранжевый, серый) для труб с дефектами разной опасности. Подземные, как и наземные, трубы должны быть «узнаваемы» без раскопов, к ним должен быть легкий доступ, включая использование радаров. Любой раскоп, любое шурфование – это травма для трубопровода, которая должна

быть минимизирована. Принцип «не навреди» будет реализован только при максимальном учете в процессе раскопа всей истории жизни особенностей каждой трубы, ее диагностик, ремонтов, предыдущих шурфовок и пр.

Внутритрунная диагностика [15] на некоторых нефтепродуктопроводах иногда выявляет 150...200 дефектов на 1 км, глубина коррозии которых достигает 60 % толщины стенки трубы, несмотря на наличие их электрохимической защиты. Отремонтировать все и сразу невозможно, надо изучать, какие у трубы имеются дефекты, врожденные (оставленные при строительстве) и приобретенные, кроме утонения, есть ли дополнительные причины для концентраций напряжений. Этих причин много.

Из небольших кусочков (примерно 10×20×5) полосы или трубного металла условные знаки (рис. 14), описанные в технической документации, могут пояснить будущим диагностам особенности трубы, которые были устранены в процессе строительства (реконструкции) трубопровода. Эти условные знаки, располагаемые на теле трубы, могут касаться механических повреждений разного происхождения, указывать места с допустимыми дефектами, оставленными без ремонта, зоны, отремонтированные подваркой или по другой технологии. Условные знаки административного характера могут указывать на исполнителя работ, причины ремонта, дату и другие сведения, которые могут оказать через много лет решающее значение при определении степени опасности труб и установлении очередности ремонта.

Строительные организации, которые научатся нумеровать, кодировать особенности труб, размещать их номера вдоль трассы, будут более востребованы, чем другие строители. Возрастет авторитет и диагностов, которые научатся со временем в своих отчетах указывать номер (код) проблемной трубы. Эксплуатационники должны без раскопов по данным дефектограммы внутритрубног дефектоскопа научиться размечать на поверхности проблемные трубы. Все это уменьшит объемы раскопов, механических воздействий, увеличит надежность, срок службы подземных трубопроводов. Необходимо наблюдение за каждой трубой с учетом ее происхождения, истории жизни, ремонтов, диагностик в течение многих десятилетий. Такой подход увеличит информативность и обеспечит долголетие подземных трубопроводов.

Выводы

1. Естественные, допустимые при изготовлении, и приобретенные в процессе эксплуатации дефекты делают все трубы подземных трубопроводов разными, по-разному опасными. Опасность с возрастом

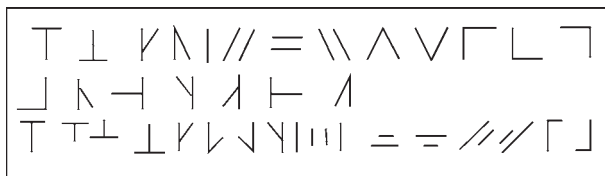


Рис. 14. Знаки технологических особенностей реконструкции: оставленные дефекты, места подварки, ремонта, механических повреждений

(деградацией) растёт. Поэтому техническое состояние, учет результатов ремонтов, диагностик, расчетов на прочность, планирование мероприятий по поддержанию работоспособности должно вестись по-трубно, а не по-километрово, т.е. конкретно и индивидуально. Для этого все трубы (секции) должны иметь свои номера (коды), читаемые внутритручными и ручными дефектоскопами.

2. Для индикации разнообразных дефектов, число которых может исчисляться сотнями на 1 км, для установления очередности ремонтов необходимо использовать трехуровневое принятое в мировой практике цветное ранжирование опасности дефектных зон, которая, если не принимать мер, не делать ремонт, переходит от серого к оранжевому и красному.

3. Номера (коды) труб, места расположения ранжированных дефектных зон, их цвета (опасности) должны быть вынесены на поверхность трассы, что облегчит наблюдение за ними без шурфования и раскопов, т.е. почти как у наземных трубопроводов.

4. Для кодирования (нумерации) труб (секций), считываемого как внутритручными, так и ручными дефектоскопами, достаточно использовать комбинации двух-трех штриховых элементов или комбинаций двух-трех отверстий на кодовой пластине, располагаемой на теле трубы под изоляцией в детерминированном месте, например, в околошовной зоне на пересечении монтажного кольцевого и продольного швов.

5. Ранжирование дефектных зон требует следующей последовательности. После расшифровки дефектограмм делается по-трубная разметка дефектов, что дает общую картину расположения дефектных труб на трассе. Далее по мере изучения материалов о каждой дефектной трубе, выполнения прочностных и экспертных расчетов с учетом весовых коэффициентов, учитывающих размеры дефектов, появляются и другие обстоятельства, после чего устанавливается степень опасности и очередность ремонта. Со временем ранжирование дефектных зон должно уточняться, так как уровень опасности с возрастом повышается.

Список литературы

1. Троицкий В. А. (2002) *Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин*. Киев, Феникс.
2. Бут В. С., Олійник О. І. Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів. *Зб. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатацій конструкцій, споруд та машин»* за 2004–2006 рр., Ресурс, сс. 490–500.
3. Абакумов А. А., Абакумов А. А. (М. Л.). (2001) *Магнитная диагностика газонефтепроводов*. Москва, Энергоатомиздат.
4. Клюев В. В. (ред.), Мужикский В. Ф., Горкунов Э. С., Шербинин В. Е. (2010) *Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах*. Т. I. Москва, Спектр.
5. Патон Б. Е., Троицкий В. А. (2016) Основные направления работ ИЭС им. Е. О. Патона в совершенствовании неразрушающего контроля сварных соединений. *Сб. материалов 8-й Национальной конференции UkrNDT-2016*, сс. 8–28.
6. Цих В. С., Яворский А. В. (2016) Электромагнитный контроль изоляции подземных трубопроводов с поверхности земли. *Сб. материалов 8-й Национальной конференции UkrNDT-2016*, сс. 206–207.
7. Джала Р. М., Вербенец Б. Я., Мельник М. І. (2016) Нові методи контролю ПКЗ підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів. *Сб. матеріалів 8-й Національної конференції UkrNDT-2016*, сс. 236–239.
8. Дубов А. А. Магнитометрическая диагностика подземных трубопроводов. www.energodiagnostics.ru.
9. Чирсков В. Г., Березин Л. Г. и др. (1991) *Строительство магистральных трубопроводов*. Справочник. Москва, Надра.
10. Саража С. В. (2013) Внедрение новой концепции диагностики технологических трубопроводов в ОАО «Самотлорнефтегаз». *Территория NDT*, 4, 36–41.
11. Чернов А. А., Кауфман Л. И., Григорьев П. А. (1986) *Способ определения местоположения дефектов трубопровода*. А. с. 1214984, МПК8:F17D3/00, Опубл. 28.02.86.
12. Карнавский Е. Л., Агинец Р. В., Бужайло А. Ф., Савченков С. В. (2014) *Маркер для внутритрубной диагностики*. РФ, Пат. 2511787, МПК9:F17D5/02, опубл. 10.04.2014.
13. Коваленко А. Н. (2016) Системы определения местоположения дефектов на трубопроводе. *Контроль и диагностика*, 2, 27–35.
14. Галиулин Р. В., Башкин В. Н., Галиулина Р. А. (2013) Проблема несанкционированных врезок в трубопроводы жидких углеводородов. *Журнал нефтегазового строительства*, 4, 46–49.
15. Галаятдинов А. А., Зубаилов Г. И. и др. (2007) К вопросу о демонтаже трубопроводов. *Нефтегазовое дело*. <http://www.ogbus.ru>.

References

1. Troitsky, V.A. (2002) *Magnetic particle inspection of welded joints and machine parts*. Kiev, Feniks [in Russian].
2. But, V.S., Olijnyk, O.I. Strategy of development of repair technology in operational main pipelines. In: *Problems of life and operation safety of structures, constructions and machines in 2004-2006*. Transact., 490-500 [in Russian].
3. Abakumov, A.A., Abakumov, M.L. (2001) *Magnetic diagnostics of gas- and oil pipelines*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
4. Muzhitsky, V.F., Gorkunov, E.S., Shcherbinin, V.E. (2010) *Nondestructive testing*. In: Refer. book. Ed. by V.V. Klyuev. Vol. 1. Moscow, Spektr [in Russian].
5. Paton, B.E., Troitsky, V.A. (2016) Main directions of work of E.O.Paton Electric Welding Institute in improvement of nondestructive testing of welded joints. In: *Proc. of 8th Nation. Conf. UkrNDT-2016*, 8-28 [in Russian].
6. Tsikh, V.S., Yavorsky, A.V. (2016) Electromagnetic inspection of insulation of underground pipelines from ground surface. In: *Proc. of 8th Nation. Conf. UkrNDT-2016*, 206-207 [in Russian].
7. Dzhalala, R.M., Verbenets, B.Ya., Melnik, M.I. (2016) New methods of CPC inspection of underground pipelines by measurements of currents and potentials. In: *Proc. of 8th Nation. Conf. UkrNDT-2016*, 236-239 [in Ukrainian].
8. Dubov, A.A. Magnetic diagnostics of underground pipelines. www.energodiagnostics.ru [in Russian].
9. Chirskov, V.G., Berezin, L.G. et al. (1991) *Construction of main pipelines*. In: Refer. book. Moscow, Nadra [in Russian].
10. Sarazha, S.V. (2013) Implementation of new concept for diagnostics of process pipelines in OJSC Samotlorneftegaz. *Territorya NDT*, 4, 36-41 [in Russian].
11. Chernov, A.A., Kaufman, L.I., Grigoriev, P.A. (1986) *Method of identification of defect location of pipeline*. USSR author's cert. 1214984, Int. Cl. F17D3/00. Publ. 28.02.86 [in Russian].
12. Karnavsky, E.L., Aginej, R.V., Buzhajlo, A.F. et al. (2014) *Marker for in-pipe diagnostics*. Patent RF 2511787, Int. Cl. F17D5/02. Publ. 10.04.2014.

13. Kovalenko, A.N. (2016) Systems of detection of defect location on pipeline. *Kontrol i Diagnostika*, 2, 27-35 [in Russian].
14. Galiulin, R.V., Bashkin, V.N., Galiulina, R.A. (2013) Problem of unauthorized cutting into liquid hydrocarbon pipelines. *Zh. Neftegazovogo Stroitelstva*, 4, 46-49 [in Russian].
15. Galyautdinov, A.A., Zubailov, G.I. et al. (2007) To problem of dismantling of pipelines. *Neftegazovoe Delo*. <http://www.ogbus.ru> [in Russian].

В. О. ТРОЙЦКИЙ

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

МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

Багаторічна безаварійна експлуатація магістральних трубопроводів залежить від моніторингу їх технічного стану, рівня обслуговування, реалізації результатів фізичних методів їх діагностики. Розглянуто види розмітки магістральних трубопроводів, що застосовуються зараз, та які повинні бути замінені на персональні штрих і точкові коди труб. Це дозволяє об'єднати інформаційні можливості різних систем діагностик, вести локальні ремонти без травмування труб великими розкопами, стежити за експлуатацією труб з дефектами, ступінь небезпеки яких повинна мати кольорову індикацію. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 14.

Ключові слова: магістральний підземний трубопровід, дефекто-

скопія, внутрішньотрубна діагностика, моніторинг, вимір поляризаційного потенціалу, магнітометричний метод, ультразвуковий контроль, облік стану труб, маркерні і кодові пластини

V. A. TROITSKY

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

MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF MAIN PIPELINES

The long-term accident-free operation of main pipelines depends on monitoring of their technical condition, level of service, implementation of results of physical methods of their diagnostics. The applied types of marking the main pipelines are considered, which should be replaced by personal bar- and dot codes of pipes. This allows combining the information capabilities of different diagnostic systems and carrying out local repairs without traumatizing the pipes with large excavations, monitoring the operation of pipes with defects, the degree of danger of which should have a colour indication. 14 – Ref., 1 – Table, 14 – Fig.

Key words: main underground pipeline, flaw detection, interpipe diagnostics, monitoring, measurement of polarization potential, magnetometric method, ultrasonic testing, recording of pipe condition, marker and code plates

Поступила в редакцию
08.06.2017

Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайте: www.patonpublishinghouse.com.

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
В 2017 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2015 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вкладышах следующих размеров

- Первая страница обложки (190x190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200x290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200x290 мм)
- Вклейка А4 (200x290 мм)
- Разворот А3 (400x290 мм)
- 0,5 А4 (185x130 мм)
- 0,25 А4 (90x130 мм)
- Размер журнала после обрезки 200x290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации. Все файлы в формате IBM PC
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (техническая диагностика и неразрушающий контроль)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 14.09.2017. Формат 60x84/8. 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.

ДІАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ ШИРОГРАФІЇ ДЕФЕКТНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ МЕТАЛЕВИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАНЕСЕНИМ ЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ

Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. А. ЗНОВА², В. А. ПІВТОРАК¹, І. В. КИЯНЕЦЬ¹

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Представлена технологія неруйнівного контролю дефектності елементів конструкцій, виготовлених із металевих та композиційних матеріалів з нанесеним захисним покриттям. Технологія базується на використанні методу електронної ширографії у поєднанні з термічним способом навантаження досліджуваного об'єкта. Ефективність застосування технології показана при виявленні пошкоджень нанесення покриття різних типів на поверхню досліджуваних об'єктів (плоских та складної форми) як на тестових зразках, так і на натурних елементах конструкцій (панелей та турбінних лопаток). Бібліогр. 18, рис. 10.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, діагностика конструкцій, покриття, електронна ширографія

В сучасних галузях машинобудівної, авіаційної та аерокосмічної промисловості значна увага приділяється питанням підвищення надійності, екологічності та ресурсу машин і конструкцій, що випускаються. Їх вирішення потребує застосування матеріалів, здатних працювати в різних агресивних середовищах, в умовах високих температур та тисків, підвищених вібрацій при змінних контактних, ударних, статичних навантаженнях та ін.

Багато робочих параметрів виробу в основному визначаються станом поверхневого шару матеріалу, з якого він виготовлений. Тому використання дефіцитних та дорогих матеріалів в цілому об'ємі виробу недоцільно. Економічно виправдовує себе застосування при виготовленні машин та конструкцій матеріалів із спеціальними покриттями, які забезпечують необхідний комплекс властивостей.

Покриття найчастіше застосовуються в техніці з метою захисту металів від корозії (захисні) та високої температури (жаростійкі), також використовуються для підвищення зносостійкості, поверхневої твердості виробів (зміцнювальні) і з метою відновлення робочих поверхонь, пошкоджених внаслідок зношування, корозії, ерозії, кавітації.

Складність процесу нанесення захисних та зміцнюючих покриттів іноді призводить до утворення дефектів з'єднання з основою, що викликає деформації шару покриття, а в подальшому його руйнування. З метою підвищення якості елементів та вузлів конструкцій, що виготовляються з використанням покриттів, застосовуються сучасні методи їх неруйнівного контролю як на стадії виготовлення, так й на стадії експлуатації.

Головною відмінністю та безперечною перевагою сучасних методів неруйнівного контролю (НК) якості від інших методів діагностики є можливість оцінити параметри та робочі якості об'єкта, використовуючи способи, що не передбачають зупинку роботи всієї системи, демонтажу або вирізання зразків. Дослідження може проводитись безпосередньо в умовах експлуатації, що дозволяє зменшити матеріальні та часові витрати, підвищити надійність контролюваного об'єкта.

Завдяки НК є можливість виявляти дефекти різних типів – брак виготовлення, тріщини, мікропори, пустоти, включення, розшарування, концентрацію внутрішніх напружень та багато інших, що викликані різними процесами при виготовленні та експлуатації конструкцій. В зв'язку з цим, важливим є удосконалення відомих і розробка нових сучасних автоматизованих методів і засобів контролю якості машин і конструкцій.

На даний час для виявлення дефектів у матеріалах і конструкціях застосовують низку неруйнівних методів, до якої входять: радіологічні, акустичні, люмінесцентні, метод вихрових струмів і інші [1, 2]. Кожен з цих методів має свої недоліки і переваги, але жоден з них не є універсальним і не задовольняє усім вимогам, що пред'являються до засобів і методів неруйнівного контролю. Тому перспективним є використання комплексних методів контролю, які поєднують у собі декілька способів.

Групу вищезазначених методів контролю вдало доповнюють методи лазерної інтерферометрії, серед яких в останні роки інтенсивний розвиток отримали нові методи лазерної інтерферометрії – спекл-інтерферометричні методи [3]. Пер-

спективним для інженерних застосувань є метод зсувної спекл-інтерферометрії (ширографії) [4–6]. Цей метод, за допомогою якого є можливим безпосередньо отримати значення похідних від переміщень, є ефективним при аналізі деформацій, оскільки в ньому виключається процес, що призводить до похибки чисельного диференціювання, необхідний для обрахунку деформацій і напружень по переміщенням.

Метод широкографії не потребує особливого захисту від вібрацій, оскільки в методі реєструються похідні від переміщень. Метод широкографії не чутливий також до переміщення об'єкту як цілого, оскільки таке переміщення не викликає деформації.

Розвиток комп'ютерної і обчислювальної техніки дозволив суттєво удосконалити метод широкографії і розробити метод електронної широкографії [7, 8]. Важливою характерною особливістю методу електронної широкографії є те, що вона дає змогу виводити динамічну картину інтерференційних смуг на екран дисплею, виключаючи будь-який запис на реєструюче середовище. Відносна простота цього методу дозволяє застосувати його для вирішення суттєво більш складних задач, що пов'язані з аналізом деформацій та контролем якості конструкцій в промислових умовах.

На даний час електронна широкографія розвивається і має такі переваги, як наочність, безконтактність, високу чутливість, можливість виконання досліджень в реальному масштабі часу об'єктів складної форми та значних розмірів [9–13]. Окрім цього, важливою перевагою, як було згадано вище, є нечутливість до вібрацій. Саме завдяки цьому метод електронної широкографії є ефективним для застосування у промисловості при вимірюванні та аналізі деформацій, неруйнівному контролі якості конструкцій довільної геометричної форми, а також оптимізації деталей машин і елементів конструкцій із різноманітних конструкційних матеріалів.

Суть методу, принцип роботи широкографічного пристрою, його оптична та блок-схеми добре відомі [4, 7, 8]. При проведенні експериментів з метою створення технології виявлення пошкоджень з'єднання шару покриття та основи застосовувалась широкографічна система, що базується на інтерферометрі Майкельсона і чутлива до деформацій, які ортогональні площині об'єкту (рис. 1).

Розробка технології для виявлення пошкоджень покриття різних типів, нанесених на поверхню досліджуваних об'єктів, з використанням методу електронної широкографії базується на результатах експериментальних досліджень, що проводилися як на тестових зразках, так і на натурних елементах конструкцій.

Досліджувані об'єкти закріплювалися в механічному пристрої у вертикальному або горизонталь-

ному положенні на відстані від 500 до 700 мм від широкографічного інтерферометра. Кут між напрямками освітлення та спостереження мав величину менше 10° . Запис широкограм здійснювався зі збільшенням від 1 до 1,5 як на стадії нагрівання, так і на стадії охолодження. Величина широзсуву для різних об'єктів змінювалась від 2 до 5 мм уздовж напрямку OX або OY .

Результати, що характеризують наявність дефекту з'єднання шару покриття з основою, наведені на рис. 2. Одержані широкограма, 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагріву та крива зміни цієї похідної уздовж обраних перерізів. На них відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність закладених дефектних зон (відмічені стрілками).

Проводились експерименти з НК якості плоских елементів конструкцій з метою візуалізації дефектів з'єднання основи з нанесеним металевим покриттям різних типів. Відпрацювання технології широкографічного виявлення дефектних ділянок проводили на тестових зразках розміром $150 \times 150 \times 5$ мм, виготовлених із алюмінієвого сплаву АМг6, на які були нанесені методом електродугового напилення Cu, Zn та сталеве покриття товщиною від 100...300 мкм. Попередньо в зразках були закладені штучні дефекти (розміром від 5 до 10 мм) у вигляді зон пошкодження адгезії та ділянок без дробоструминної обробки.

В якості навантаження зразків використовувалась термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою від 150 до 200 $^\circ\text{C}$, впродовж 15...20 с. Як приклад, на рис. 3 наведені результати, отримані для мідного покриття, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою.

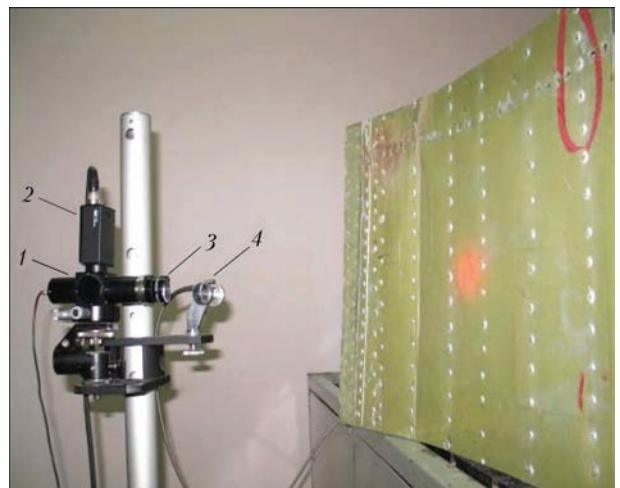


Рис. 1. Ширографічна система для неруйнівного контролю якості елементів авіаційних конструкцій: 1 – широкографічний інтерферометр; 2 – CCD-камера; 3 – об'єкт; 4 – світлопровід для передачі лазерного світла

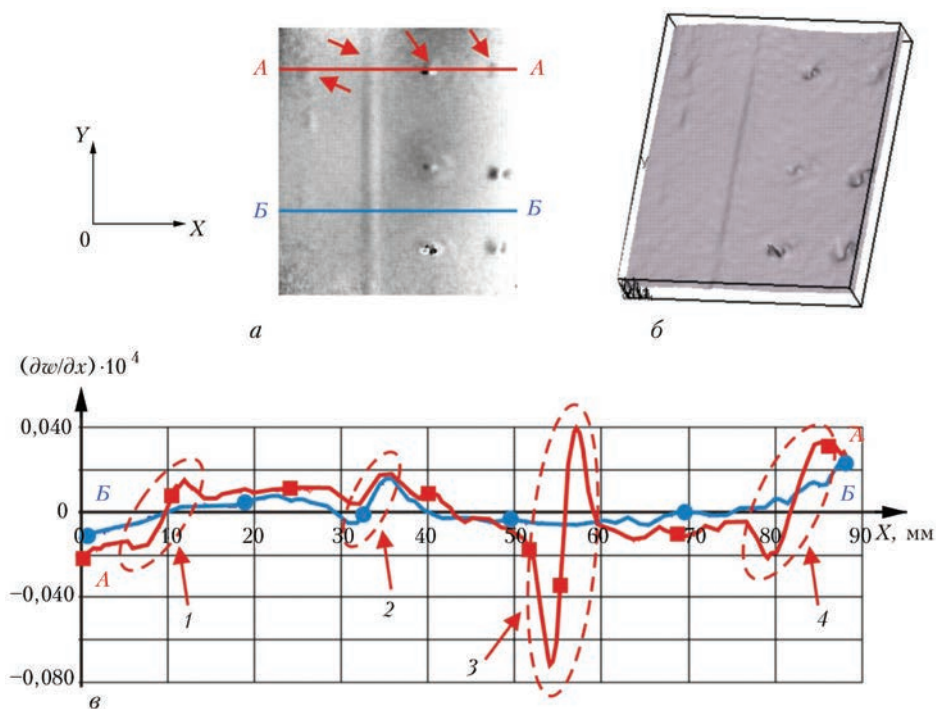


Рис. 2. Ширографічний контроль тестового зразка з основою із АМг6 та нанесеним Zn покриттям при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 15 с: а – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагріву; в – крива зміни похідної $\partial w / \partial x$ уздовж обраних перерізів А-А та Б-Б: ділянки з вибірками 1...2 мм, що були зашпакльовані (1, 4); смуга, що не оброблялась дробоструминним способом шириною приблизно 1 мм (2) та зона пошкодження адгезії розміром 5 мм (3)

Створення конкурентоздатних на світовому ринку газотурбінних двигунів (ГТД) нового покоління передбачає значне зростання їх надійності та ресурсу. Незважаючи на прогрес у розвитку авіаційної техніки та відпрацьований процес виробництва газотурбінних авіадвигунів, у таких конструкціях з ряду причин виникають дефекти

різного типу й розмірів, що призводить до зниження працездатності й довговічності конструкції або до аварійних ситуацій.

Розвиток машинобудування визначається, головним чином, можливістю створення і отримання в достатній кількості конструкційних матеріалів, здатних протистояти дії агресивних газових

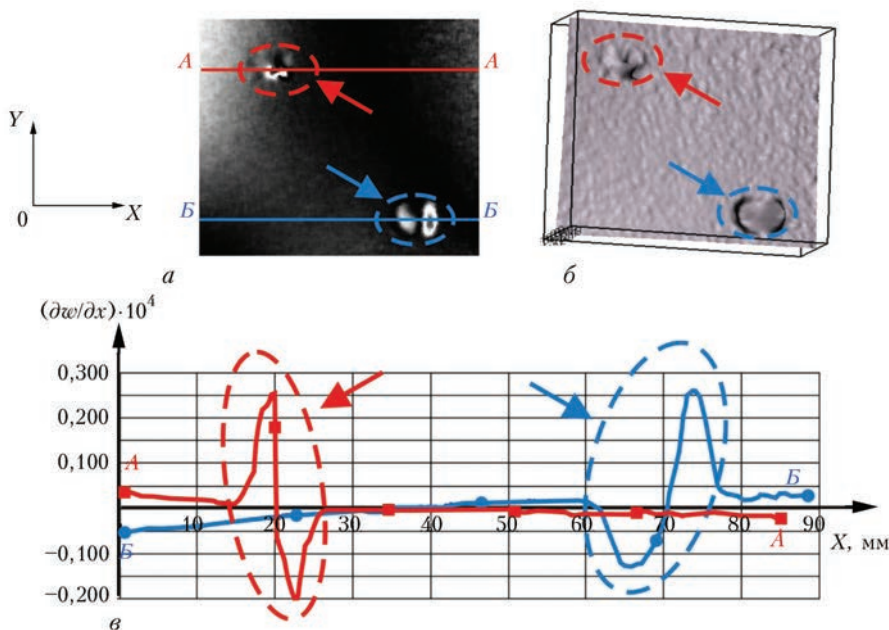


Рис. 3. Ширографічний контроль тестового зразка з основою із АМг6 та нанесеним Si покриттям при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 20 с: а – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагріву; в – крива зміни похідної $\partial w / \partial x$ уздовж обраних перерізів А-А та Б-Б (ділянки без дробоструминної обробки)

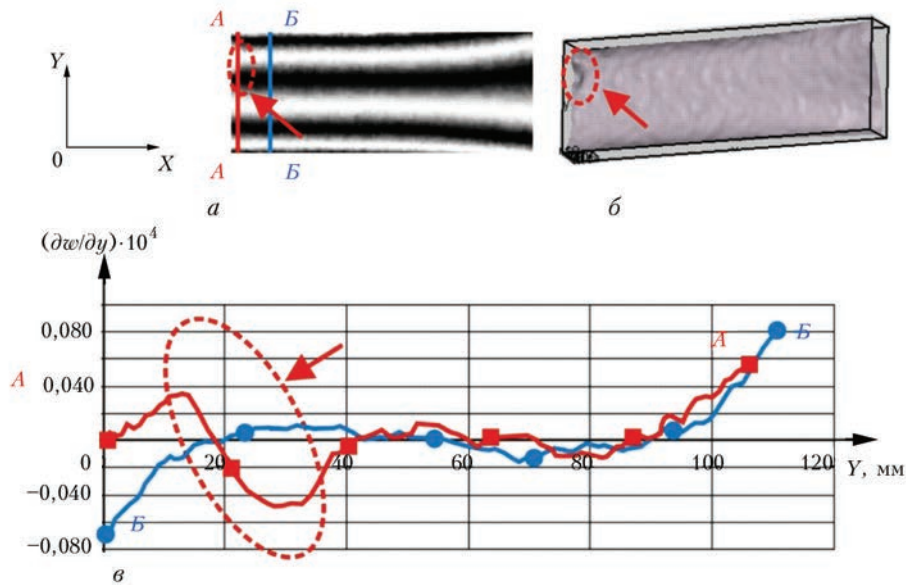


Рис. 4. Ширографічний контроль елемента сталеві (Ст6) труби з нанесеним жаростійким покриттям Co–Cr–Fe–Y товщиною 60 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 300 °С впродовж 60 с: а – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії охолодження; в – крива зміни похідної $\partial w / \partial y$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з зоною штучного пошкодження адгезії) та Б-Б (бездефектна ділянка)

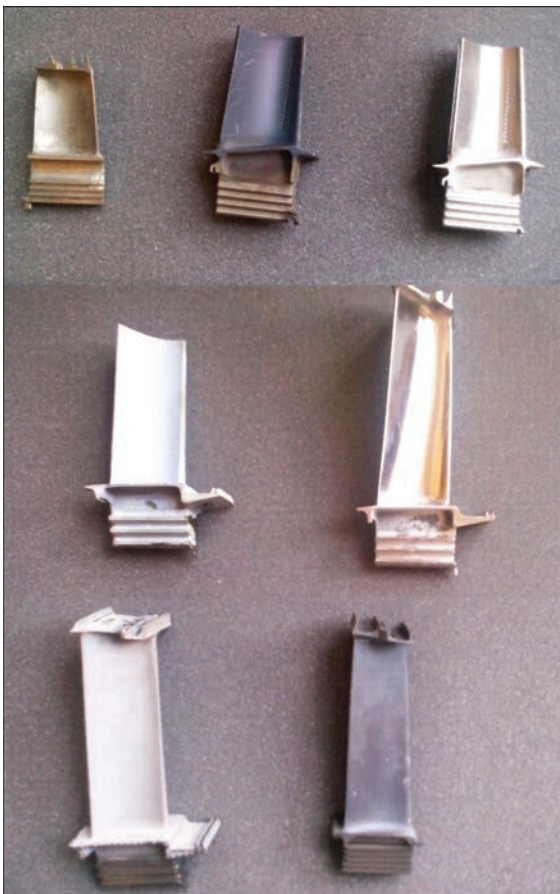


Рис. 5. Турбінні лопатки різних типів, розмірів та форми, що досліджувались методом ширографії з використанням термічного способу навантаження

середовищ, високих температур і механічних навантажень. Особливо гостро ці питання стоять для газотурбінобудування, де деталі газотурбінних двигунів і установок працюють тривалий час

в умовах теплосмін, дії компонентів топлива і продуктів його згорання, а також твердих частинок, що поступають разом з повітрям, що зрештою призводить до пониження їх ресурсу роботи [14].

Одним з шляхів вирішення вказаних проблем є застосування високоефективних ресурсозберігаючих технологій нанесення захисних (корозійно- і ерозійностійких) покриттів. Нанесення захисних покриттів на деталі газових турбін забезпечує істотне підвищення ресурсу їх роботи. Завдяки цьому вдається досягти багатократної економії матеріальних, сировинних, трудових ресурсів. Надійна робота газових турбін значною мірою залежить від працездатності, насамперед, лопаток, що знаходяться в області більш високих температур [14].

З метою адаптації розробленої ширографічної технології НК якості у випадку елементів конструкцій складної форми (труби, турбінні лопатки) проводились експериментальні дослідження з використанням тестового сталевого (Ст6) трубчатого зразка розміром 300×60 мм та товщиною стінки 5 мм з попередньо закладеними дефектами у вигляді штучного пошкодження з'єднання нанесеного методом електронно-променевого напилення покриття товщиною 60 мкм типу Co–Cr–Fe–Y з основою (дефекти розмірами від 10 до 20 мм).

В якості навантаження використовували термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою близько 300 °С впродовж 60 с. Результати, що характеризують наявність дефекта з'єднання шару покриття з основою наведені на рис. 4. Отримані інтерференційна картина, 3D зображення розподілу похідної на досліджуваній

ділянці поверхні зразка та крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектних зон (відмічено стрілкою).

Проводилась серія експериментів з НК якості натурних турбінних лопаток (рис. 5) різного розміру (від 65 до 150 мм), форми, матеріалу основи (жаростійкі сталі типу ЖС6 різних модифікацій) та жаростійкого покриття (Co–Cr–Fe–Y, Co–Cr–Al–Y, Co–Cr–Fe–ZrO₂ та інші) товщинами від 40 до 90 мкм, нанесеного методом електронно-променевого напilenня. В якості навантаження використовували термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою від 150 до 300 °C впродовж 5...15 с.

Результати, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою, наведені на рис. 6–8. Одержані інтерференційні картини, 3D зображення розподілу похідної на досліджуваній поверхні та криві зміни похідної $\partial w/\partial x$ або $\partial w/\partial y$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися ділянки з локальними різкими змінами величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектних зон (відмічені стрілкою).

На рис. 6 наведені результати контролю бездефектної лопатки, на рис. 7, 8 результати контролю турбінних лопаток різних типів та форми з дефек-

тними зонами. Аналіз наведених картин показує, що розроблена технологія широкографічного НК якості з використанням термічного навантаження певного рівня дає можливість виявляти зони пошкодження з'єднання шару покриття з основою, незалежно від типу дефекту та місця його локалізації.

Зменшення маси конструкції, як інструмент підвищення економічної ефективності літальних апаратів, є однією з пріоритетних задач розвитку сучасної авіаційної техніки. В контексті вирішення даної проблеми при створенні нових літаків все більш широке застосування знаходять композиційні матеріали [15, 16].

Область застосування композиційних матеріалів в авіабудуванні досить велика. Вони застосовуються для виготовлення високонавантажених деталей літаків (обшивки, лонжеронів, нервюр, панелей і т. д.) і двигунів (лопатки вентиляторів і компресори.), в космічній техніці для вузлів силових конструкцій апаратів, що піддаються нагріву, для елементів жорсткості, панелей [17].

З метою захисту конструкцій, що виготовлені з полімерних композиційних матеріалів (ПМК), використовують лакофарбові покриття різних типів. Вибір лакофарбового покриття має відбуватися з урахуванням конструктивних особливостей та умов експлуатації виробів та елементів конструкцій. Надійність, довговічність та декоратив-

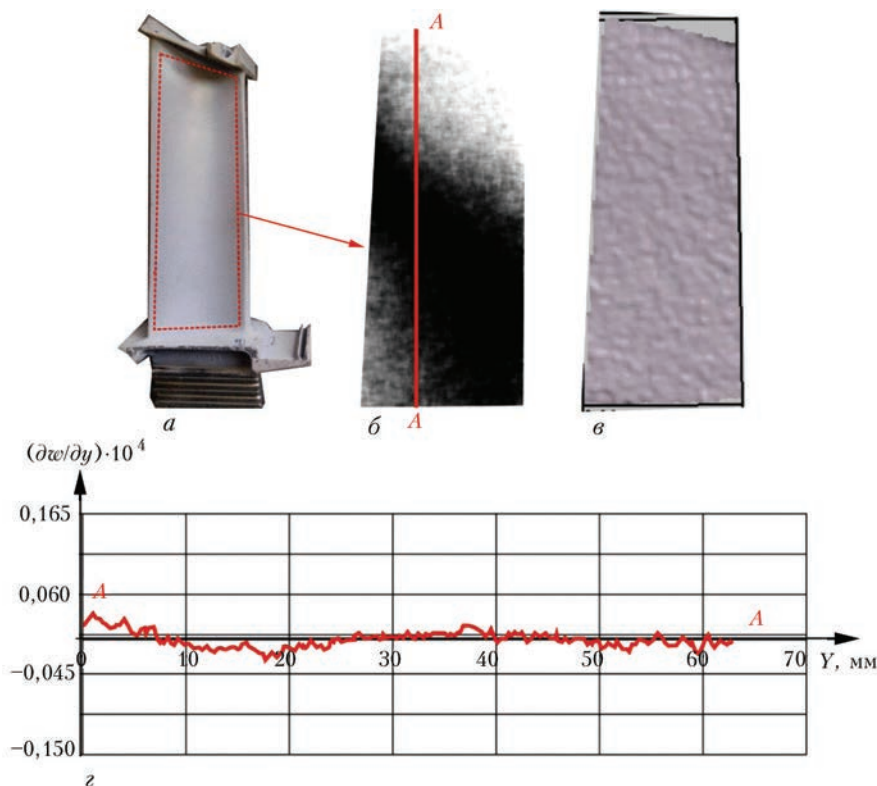


Рис. 6. Ширографічний контроль бездефектної турбінної лопатки з нанесеним жаростійким покриттям Co–Cr–Fe–Y товщиною 60 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °C впродовж 10 с: а – контрольована турбінна лопатка; б – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w/\partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні лопатки на стадії охолодження; г – крива зміни похідної $\partial w/\partial y$ уздовж обраного перерізу А-А

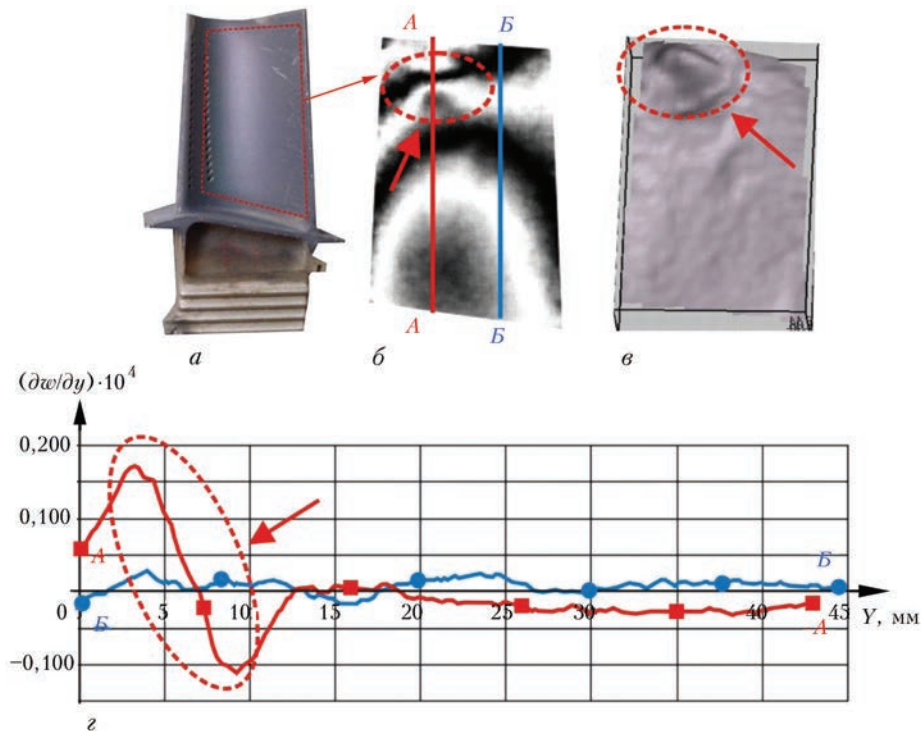


Рис. 7. Ширографічний контроль турбінної лопатки з нанесеним жаростійким покриттям Co–Cr–Fe–ZrO₂ товщиною 80 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 15 с: а – контрольована турбінна лопатка, б – широграма контрольованої ділянки з нанесеними досліджуваними перерізами; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial y$ на досліджуваній ділянці лопатки на стадії охолодження; г – крива зміни похідної $\partial w / \partial y$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з дефектом) та Б-Б (бездефектна ділянка)

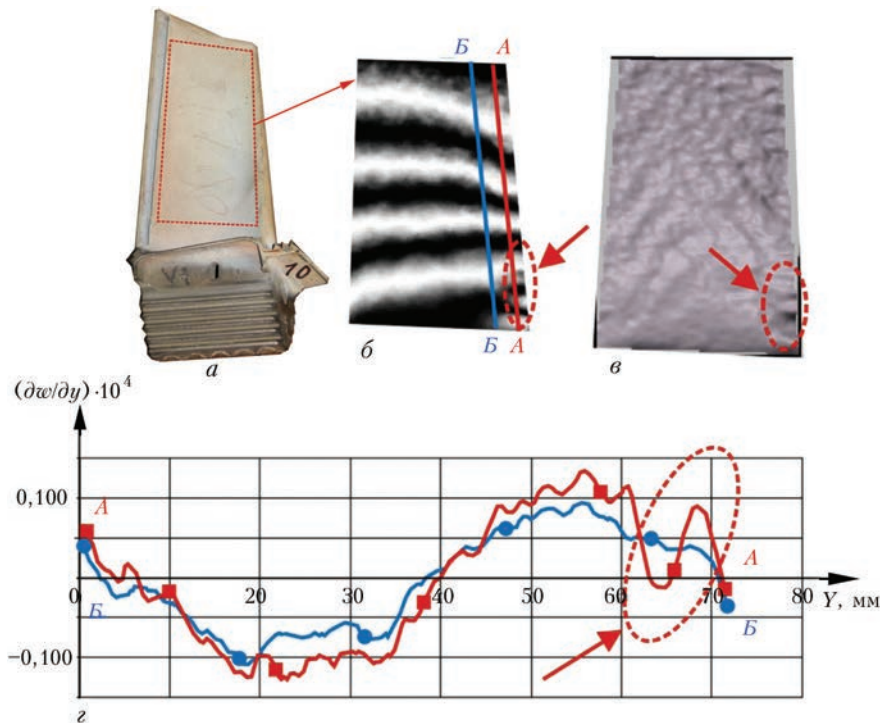


Рис. 8. Ширографічний контроль турбінної лопатки з нанесеним жаростійким покриттям Co–Cr–Al–Y товщиною 50 мкм при термічному навантаженні обдувом повітрям температурою 150 °С впродовж 12 с (опис а–г такий же, як на рис. 7)

ний вигляд покриття зумовлені низкою факторів: властивостями лакофарбового матеріалу, схемою побудови системи захисного покриття, умовами та режимом формування кожного його шару. Кожний фактор окремо та всі вони разом мають велике значення в процесі отримання якісного покриття.

Умови експлуатації авіаційних виробів, виготовлених з ПМК, можуть бути різноманітні, тому й захисні лакофарбові покриття мають забезпечувати працездатність і зовнішній вигляд виробів під впливом підвищеної вологості та температури в умовах УФ-випромінювання. Для цього вони

повинні мати спеціальні характеристики, такі як, стійкість до ерозії та загоряння, можливість роботи в оточенні агресивних рідин та інші.

При виготовленні та експлуатації конструкцій із композиційних матеріалів виникають дефекти, які спроможні призвести до зниження експлуатаційних характеристик конструкції, або її руйнування [15, 17]. Серед дефектів найбільш поширеними є: пористість, розшарування, руйнування зв'язки волокно-матриця, створення ділянок зі зниженим або підвищеним процентом зв'язувального. До виникнення дефектів призводить порушення технологічного режиму виготовлення елементів конструкцій, наприклад, недостатня очистка та підготовка поверхні, а також удари, надмірні напруження, дія вологи, підвищених температур при експлуатації [16].

Методи неруйнівного контролю якості конструкцій дозволяють виявити дефекти на етапі їх виготовлення, а також проводити періодичні перевірки цілісності композитних конструкцій під час експлуатації з метою заміни або ремонту дефектних деталей [17, 18].

Проводились експериментальні дослідження з використанням розробленої широкографічної технології виявлення дефектів з'єднання шару покриття з основою для випадку елементів авіаційних конструкцій, виготовлених з композиційних матеріалів. Виконувалась серія експериментів з використанням тестових зразків розміром $150 \times 100 \times 2$ мм, що виготовлені з препрегів різних марок фірми «Hexcel», з попередньо закладеними штучними дефектами у ви-

гляді зон примусового пошкодження з'єднання нанесеного покриття лакофарбового типу з основою.

В якості навантаження використовували термічний спосіб у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою від 100 до 150 °С впродовж 10...15 с. Результати, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою наведені на рис. 9. Одержані інтерференційні картини, 3D зображення розподілу похідної на досліджуваній ділянці поверхні зразків та криві зміни похідної $\partial w / \partial u$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектних зон (відмічені стрілками).

Аналіз одержаних результатів показує, що використання термічного навантаження в поєднанні з методом електронної широкографії, дозволяє контролювати композитні матеріали, які мають складну внутрішню структуру. Ця структура візуалізується на широкограмах у вигляді локальних змін похідної $\partial w / \partial x$ або $\partial w / \partial y$ невеликої амплітуди, на фоні яких вирізняються дефектні зони пошкодження з'єднання нанесеного захисного покриття з основою.

Виконувався широкографічний контроль елемента натурної композитної панелі з ребрами, вкритої методом напилення шаром захисного лакофарбового покриття, розміром $585 \times 385 \times 2$ мм з використанням термічного навантаження у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою 100 °С впродовж 10 с з відстані близько 100 мм.

Результати, що характеризують наявність дефектів з'єднання шару покриття з основою, наведе-

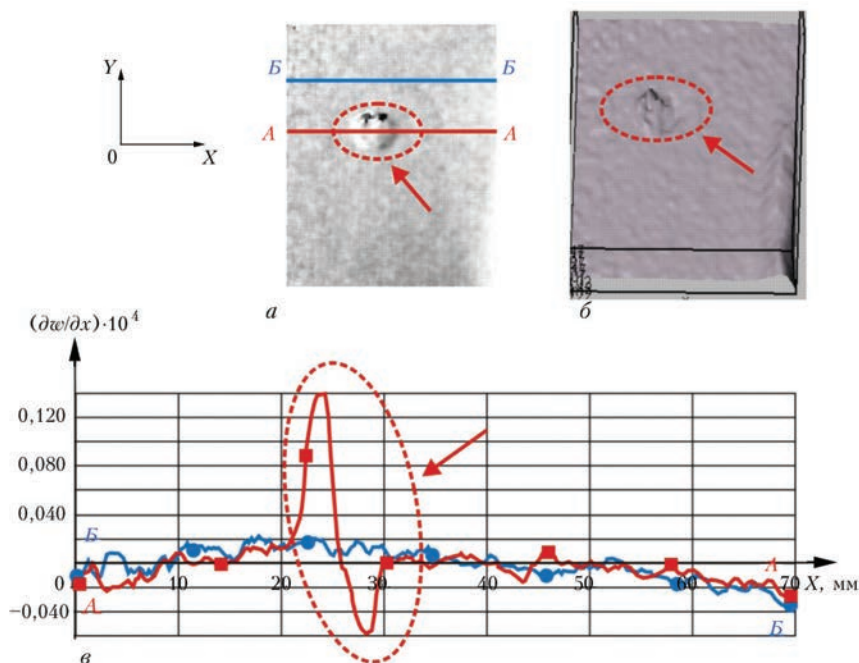


Рис. 9. Ширографічний контроль тестового композитного зразка з нанесеним лакофарбовим покриттям розміром $150 \times 100 \times 2$ мм з використанням термічного навантаження у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою 150 °С впродовж 10 с: а – широкограма контрольованої ділянки зразка з нанесеними досліджуваними перерізами; б – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial x$ на досліджуваній ділянці поверхні зразка на стадії нагрівання; в – крива зміни похідної $\partial w / \partial x$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з дефектною зоною) та Б-Б (бездефектна ділянка)

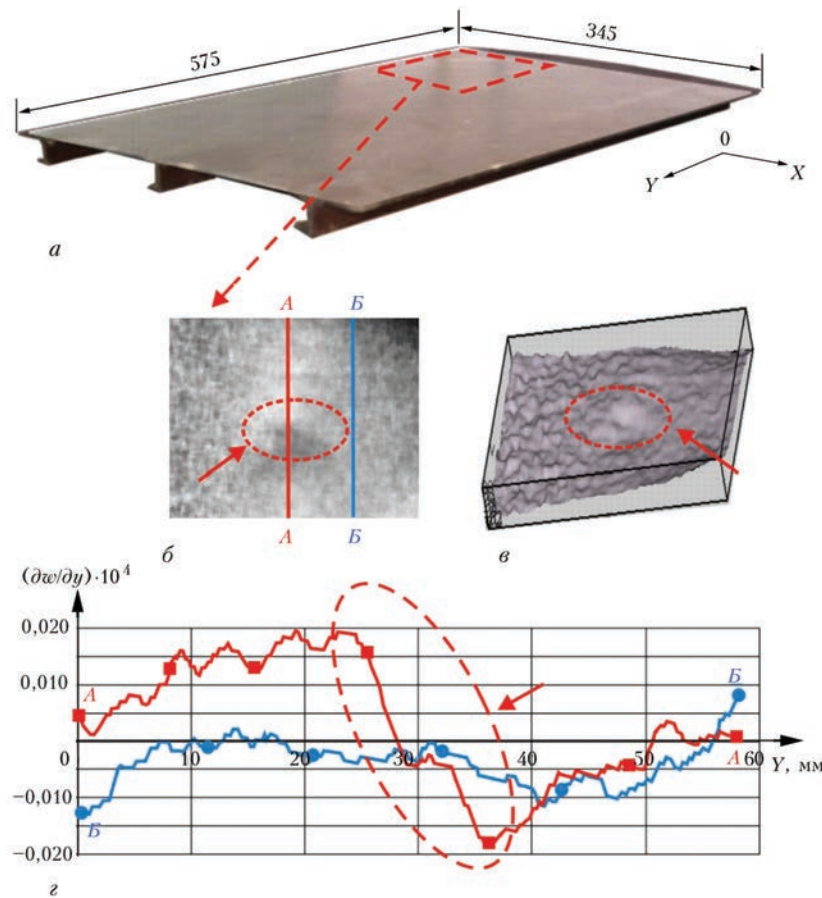


Рис. 10. Ширографічний контроль елемента натурної композитної панелі з ребрами, вкритої шаром захисного лакофарбового покриття, з використанням термічного навантаження у вигляді обдуву гарячим повітрям температурою 100 °C впродовж 10 с: а – контрольований елемент панелі; б – широграма контрольованої ділянки елемента з нанесеними досліджуваними перерізами; в – 3D зображення розподілу похідної $\partial w / \partial y$ на досліджуваній ділянці поверхні елемента на стадії нагрівання; г – крива зміни похідної $\partial w / \partial y$ уздовж обраних перерізів А-А (ділянка з дефектною зоною) та Б-Б (бездефектна ділянка)

дені на рис. 10. Отримані інтерференційна картина, 3D зображення розподілу похідної на контрольованій ділянці поверхні елемента панелі та криві зміни похідної $\partial w / \partial y$ уздовж обраних перерізів, на яких відображалися локальні різкі зміни величини та знаку похідної, що характеризують наявність дефектної зони (відмічені стрілками).

Аналіз результатів досліджень підтвердив ефективність застосування електронної ширографії з використанням термічного навантаження при проведенні неруйнівного контролю якості елементів конструкцій, виготовлених як з металевих, так і композитних матеріалів. Розроблена технологія контролю дефектності елементів металевих та композитних конструкцій з нанесеним захисним покриттям може застосовуватись не тільки в умовах лабораторій неруйнівного контролю якості, але й в умовах виробництва.

Список літератури

- (2001) *Неруйнівний контроль і технічна діагностика*. З. Т. Назарчук (ред.). Львів, Фіз.-мех. Ін-т.
- Недосека А. Я. (2001) *Основы расчета и диагностика сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред). Киев, Книга.
- Джоунс Р., Уайкс К. (1986) *Голографическая и спекл-интерферометрия*. Москва, Мир.
- Rastorgi P. K., Inaudi D. (ed.) (2000) *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*. Oxford, Elsevier Science B.V.
- Leendertz J. A., Butters J. N. (1973) An image – shearing speckle – pattern interferometer for measuring bending moments. *J. Phys. E.: Sci. Instrum.*, **6**.
- Hung Y. Y., Tailor C. E. (1974) A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacement. *Exp. Mech.*, **4**.
- Hung Y. Y., Ho H. P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.*, **49**, 61–87.
- Collrep J., Krupka R., Siebert T. (2007) Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components. *NDT Word Review*, **36**, **6**, 28–31.
- Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкая Е. М., Киянец И. В. (2004) Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 25–28.
- Feng H. J., Zhang J., Liu X. K. (2012) Studies on digital shearography for testing of aircraft composite structures and honeycomb-based specimen. *Appl. Mech. Mater.*, **121-126**, 1264–1268.
- Wu S. J., Zhu L. Q., Feng Q. B. et al. (2012) Digital shearography with in situ phase shift calibration. *Opt. Laser Eng.*, **50**, 1260–1266.
- Xie X., Xu N., Sun J. F. et al. (2013) Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography. *Opt. Commun.*, **286**, 277–281.
- Лобанов Л. М., Знова В. А., Пивторак В. А., Киянец И. В. (2014) Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом

- электронной широгрaфии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 15–18.
14. Shiyuan Luo, Dahu Zhu, Lin Hua et al. (2016) Effects of Process Parameters on Deformation and Temperature Uniformity of Forged Ti–6Al–4V Turbine Blade. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **25**, 11, 4824–4836.
 15. Добриденко О. М., Скляр О. І., Турчин В. М., Белінська Р. Б. (2012) Аналіз існуючих композитних матеріалів та оцінка їх застосування у конструкціях планерів літальних апаратів військової авіації України. *Зб. наук. праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, **15**, 146–152.
 16. Fahr A. (2014) *Aeronautical Applications of Non-destructive Testing*. Canada.
 17. Genest M., Brothers M., LeBlanc R. Fahr A. (2010) NDE of Composite Structures using Ultrasonic, Thermography and Laser Shearography. *Proceedings of SAMPE Conference*, Seattle, WA, May 17–20.
 18. Genest M., Rutledge R. S., Koteri R. Et al. (2011) Pulsed Thermography and Laser Shearography for Damage Growth Monitoring. *Proceedings of the International Workshop on Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*, Montreal, Quebec, Canada, November 2–4.
- References**
1. (2001) *Nondestructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, Fiz.-Mekh. Inst. [in Ukrainian].
 2. Nedoseka, A.Ya. (2001) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Kniga [in Russian].
 3. Jones, R., Wykes, K. (1986) *Holographic and speckle interferometry*. Moscow, Mir [in Russian].
 4. (2000) Trends in optical non-destructive testing and inspection. Ed. by P.K. Rastorgi, D. Inaudi. Oxford, Elsevier Science B.V.
 5. Leendertz, J.A., Butters, J.N. (1973) An image – shearing speckle – pattern interferometer for measuring bending moments. *J. Phys. E.: Sci. Instrum.*, **6**.
 6. Hung, Y.Y., Taylor, C.E. (1974) A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacement. *Exp. Mech.*, **4**.
 7. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: an optical measurement technique and applications. *Materials Sci. and Eng.*, **49**, 61–87.
 8. Collrep, J., Krupka, R., Siebert, T. (2007) *Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components*. *NDT World Review*, **36**(6), 28–31.
 9. Lobanov, L. M., Pivtorak, V. A., Savitskaya, E. M. et al. (2004) Diagnostics of elements and assemblies of structures using the method of electron shearography. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 25–28 [in Russian].
 10. Feng, H.J., Zhang, J., Liu, X.K. (2012) Studies on digital shearography for testing of aircraft composite structures and honeycomb-based specimen. *Appl. Mech. Mater.*, 121–126, 1264–1268.
 11. Wu, S.J., Zhu, L.Q., Feng, Q.B. et al. (2012) Digital shearography with in situ phase shift calibration. *Opt. Laser Eng.*, **50**, 1260–1266.
 12. Xie, X., Xu, N., Sun, J.F. et al. (2013) Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography. *Opt. Commun.*, **286**, 277–281.
 13. Lobanov, L. M., Znova, V. A., Pivtorak, V. A. et al. (2014) Technology of non-destructive testing of the quality of elements and components of aircraft structures by electronic shearography. *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 15–18 [in Russian].
 15. Dobrydenko, O.M., Sklyar, O.I., Turchyn, V.M. et al. (2012) Analysis of existing composite materials and evaluation of their application in structures of FV airframes of military aviation of Ukraine. In: *Transact. of State Research Institute of Aviation*, **15**, 146–152 [in Ukrainian].
 16. Fahr, A. (2014) *Aeronautical applications of non-destructive testing*. Canada.
 17. Genest, M., Brothers, M., LeBlanc, R. et al. (2010) NDE of composite structures using ultrasonic, thermography and laser shearography. In: *Proc. of SAMPE Conf.* (Seattle, WA, May 17–20).
 18. Genest, M., Rutledge, R.S., Koteri, R. et al. (2011) Pulsed thermography and laser shearography for damage growth monitoring. In: *Proc. of Int. Workshop on Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace* (Montreal, Quebec, Canada, November 2–4).
- Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. А. ЗНОВА², В. А. ПИВТОРАК¹,
И. В. КИЯНЕЦ¹
- ¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²ДП «Антонов». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com
- ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ ДЕФЕКТНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНЕСЕННЫМ ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ**
- Представлена технология неразрушающего контроля дефектности элементов конструкций, изготовленных из металлических и композиционных материалов с нанесенным защитным покрытием. Технология базируется на использовании метода электронной широгрaфии в сочетании с термическим способом нагружения исследуемого объекта. Эффективность применения технологии показана при обнаружении повреждений нанесения покрытий различных типов на поверхность исследуемых объектов (плоских и сложной формы) как на тестовых образцах, так и на натурных элементах конструкций (панелей и турбинных лопаток). Библиогр. 18, рис. 10.
- Ключевые слова: неразрушающий контроль качества, диагностика конструкций, покрытия, электронная широгрaфия
- DIAGNOSTICS OF DEFECTIVENESS OF STRUCTURAL ELEMENTS, MANUFACTURED OF METAL AND COMPOSITE MATERIALS WITH PROTECTIVE COATING, APPLYING METHOD OF ELECTRON SHEAROGRAPHY**
- L. M. LOBANOV¹, V. A. ZNOVA², V. A. PIVTORAK¹,
I. V. KYIANETS¹
- ¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich str., 03150, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua
²SE «Antonov», 1, Akademika Tupoleva str., 03062, Kiev, Ukraine. E-mail: info@antonov.com
- The technology of non-destructive testing of defectiveness of structural elements manufactured of metal and composite materials with a protective coating is presented. The technology is based on using the method of electron shearography in combination with thermal method of loading the object under examination. The effectiveness of the applied technology is shown in detection of damages of deposition of different types of coating on the surface of the objects under examination (of flat and complex shape) both on test specimens, as well as on full-scale structural elements (panels and turbine blades). 18 – Ref., 10 – Fig.
- Key words: non-destructive quality control, diagnostics of structures, coating, electron shearography

Надійшла до редакції
13.07.2017

ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ

Е. Ф. ВОРОНКИН¹, Р. О. ПАСТОВЕНСКИЙ²

¹Институт сцинтилляционных материалов, НТК «Институт монокристаллов», НАН Украины. 61001, г. Харьков, пр-т Науки, 60. E-mail: voronkin@isma.kharkov.ua

²ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Показана возможность применения дисперсных сцинтилляторов большой площади для дефектоскопии изделий из металла, взамен рентгеновской пленки, на основе сцинтилляционных экранов ZnSe:Al, характеризующихся максимумом люминесценции в области фотопоглощения селенида цинка. Приведены экспериментальные данные о зависимости поглощения рентгеновского излучения образцами с использованием сцинтилляционных экранов на основе халькогенидного сцинтиллятора селенида цинка и ЭРС-С-2А от толщины образца при ускоряющем напряжении. Показана перспективность применения композитных экранов из селенида цинка при визуализации биологических объектов, что свидетельствует о возможности использования этих экранов в томографических медицинских системах. Библиогр. 12, табл. 3, рис. 7

Ключевые слова: неразрушающий контроль, сцинтилляционные экраны, дефектоскопия

Цифровая рентгенография (флюорография) относится к тем методам, при которых изображение формируется и обрабатывается исключительно ЭВМ [1]. В устройствах данного типа происходит преобразование лучевого рельефа в набор цифровых данных. То есть на каждой единице площади аналогового изображения цифровая система рассчитывает среднюю оптическую плотность и ставит ей необходимые числовые значения. Таким образом, получается изображение в виде цифровой матрицы. Единицей площади цифрового изображения является пиксель, который имеет на матрице собственные пространственные координаты. На цифровом носителе содержится информация о координатах и оптической плотности каждого пикселя.

Цифровые снимки в сравнении с аналоговыми пленочными носителями гораздо проще изучать, обрабатывать и хранить [2]. В отличие от пленочных, цифровые флюорографы работают в режиме реального времени и выдают снимки практически мгновенно. При большом количестве снимков, их можно паковать в архив, что дает возможность в любое время анализировать прогресс или регресс в течение заболевания. Цифровые фото можно отправлять по электронной почте без потери качества снимка (256 оттенков серого цвета) для консультирования со специалистами [3, 4].

Сейчас практикуют несколько вариантов получения теневого рентгеновского изображения. Основные отличия заключаются в вариантах получения снимка – с плоского сцинтилляционного экрана или методом сканирования линейным

детектором – рентгеновский сканер. Их отличие состоит во временных рамках исследования и алгоритме обработки сигналов фотодетекторов. Сканирующие матричные флюорографы послойно просвечивают объект, составляя на мониторе общую картину. Матричные флюорографы проводят экспозицию за сотые доли секунды, что очень важно, когда пациент по той или иной причине не может задержать дыхание даже на непродолжительное время. Моментальное фото грудной клетки матричного флюорографа получается очень качественное, потому что на него не влияют такие «отвлекающие» моменты, дающие ложные данные, как: пульсирующие движения сердца, аорты и крупных кровеносных сосудов.

Принципиальным отличием ПЗС-детекторов от рентгеновского экрана является формирование теневого изображения с помощью системы линз (объектива) со светящегося экрана размером 400×400 мм. При этом система линз и зеркал уменьшает изображение до размера матрицы ПЗС.

Системы с плоским экраном также применяются в дефектоскопии, где допустимо достаточно большое время экспозиции объекта.

Рентгеновские сканеры с применением детекторов типа сцинтиллятор-фотоприемник широко используются на транспорте в системах досмотра багажа пассажиров, при грузоперевозках и в почтовых отделениях. В настоящее время идет разработка разнообразных видов полупроводниковых детекторов, однако они не нашли широкого применения из-за высокой стоимости и недостаточной радиационной стойкости.

Исходя из этого можно заключить, что визуализация внутренней структуры объектов с помощью сцинтилляционных детекторов является важной и многогранной задачей, а параметры детекторов в значительной степени определяют качество получаемых изображений.

В настоящей работе приведены сравнительные данные традиционных и новых типов композитных сцинтилляционных экранов на основе халькогенидных оксисульфидных и вольфраматных люминофоров и дана оценка эффективности их применения в цифровой рентгенографии [5–7].

Отличительные особенности сканирующих и экранных систем. Как указано выше, отличие заключается в детекторах рентгеновского излучения, применяемых в аппаратах. Если взять линейный рентгеновский детектор размером около 400 мм, перемещая который вдоль пациента одновременно с веерообразным рентгеновским излучением можно просмотреть площадь 400×400 мм и более. Такие сканирующие системы имеют такие достоинства и недостатки:

Достоинства:

1. Сканирование объектов большой протяженности.

2. Возможность применения мультэнергетических детекторов, что позволяет различать материалы с разным атомным номером (органику и неорганику).

3. Возможность получения объемного отображения объекта при спиральном сканировании (применяется в томографии).

Недостатки:

1. Сложность математической обработки сигналов для реконструкции теневого рентгеновского отображения.

2. Высокие требования к механическим устройствам сканирования по вибрации и равномерности перемещения.

3. Размытие отображений движущихся объектов, например при обследовании сердца пациента.

В детекторах сканирующих систем чаще всего применяют сцинтилляционные кристаллы или керамику. Их характеристики, представленные в табл. 1, мы рассмотрим далее.

Для экранных систем характерно малое время экспозиции – сотые доли секунды. Это обязательное требование медиков при исследовании органов грудной клетки. Даже в том случае, когда пациент правильно задерживает дыхание остается пульсация аорты, сердца и крупных сосудов. Поэтому при цифровой флюорографии легких крайне важно производство «моментального» снимка, с четкой границей сосудов и сердца. Важнейшими элементами экранных рентгенографических систем являются сам рентгеновский экран и фотоприемник. Качество рентгеновского отображе-

ния на экране монитора зависит не столько от разрешающей способности рентгеновского экрана и фотоприемника, сколько от соотношения трех параметров: конверсионная эффективность люминофора, зернистость или размер частиц экрана, динамический диапазон (градиационная разрешающая способность – количество уровней серого) у экрана и фотоприемника.

Теоретически, чем большее количество пикселей у фотоприемника, тем выше разрешающая способность. Однако важным является снижение дозовой нагрузки на пациента. Уменьшить дозу и не потерять динамический диапазон изображения (число градаций оттенков серого) можно за счет высококачественной оптики и сложного алгоритма обработки изображения. Более дешевая (читай, менее качественная) оптика не дает возможности снизить дозу облучения пациента и не потерять динамический диапазон, и, как следствие, ухудшается качество «картинки» несмотря на большую разрешающую способность.

Говоря о флюорографии органов грудной клетки необходимо иметь в виду, что для их рентгенологического отображения гораздо важнее возможность передачи большего количества полутонов – градаций оттенков серого (т. е. малоконтрастных плохо очерченных образований, диаметром около 1 мм), чем способность передавать мелкие контрастные детали.

Сравнительные характеристики люминофоров. Интенсивность люминесценции экрана зависит от квантового выхода сцинтиллятора, толщины поглощающего слоя и прозрачности экрана к собственному излучению. Для повышения светового выхода экрана необходимо использовать толщину слоя сцинтилляционных частиц оптимальную с точки зрения эффективности поглощения рентгеновских квантов и выхода светового сигнала на фотоприемное устройство. Для обеспечения высокого пространственного разрешения сцинтиллятор должен обладать высоким контрастом теневого изображения а фотоприемное устройство – необходимым пространственным разрешением и максимальной чувствительностью в области максимума люминесценции люминофора. В табл. 1 приведены сравнительные параметры традиционных и новых типов люминофоров, применяемых в рентгеновских детекторах. Эти параметры дают представление о светимости (световыход, λ_{max}), поглотительной способности рентгеновских квантов (плотность и $Z_{\text{эфф}}$), условиях светособираания (показатель преломления и коэффициент ослабления собственного излучения), радиационной стойкости к рентгену и кинетике сцинтилляционного сигнала (время высвечивания и уровень послесвечения через 3 миллисекунды после прекращения рентгеновского импульса).

Таблица 1. Сравнительные данные параметров рентгеновских сцинтилляторов

Параметр	CsI(Tl)	CdWO ₄	ZnWO ₄	Gd ₂ O ₂ S:Pr,Ce,F	Gd ₂ O ₂ S:Tb	Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO:Ce)	ZnSe:Al
Абсолютный световой выход, фот./МэВ при 662 кэВ ($\cdot 10^3$)	56	20	14	35	60	30	60
Плотность, г/см ³	4,51	8,28	7,87	7,3	7,3	7,41	5,42
Эффективный атомный номер, $Z_{\text{эфф}}$	54	66	61	62	62	66,4	33
$T_{\text{плавления}}, ^\circ\text{C}$	894	1325	1200	Разлаг.	Разлаг.	2150	1520
Показатель преломления	1,79	2,3	2,2	2	2	1,82	2,5
Максимум излучения, $\lambda_{\text{max}}, \text{нм}$	550	495	490	520	550	420	610
Коэф. ослабления собственного излучения, см ⁻¹	0,05	0,03	0,05	1	0,6	0,04	0,3
Радиационная стойкость, рад	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁷
Время высвечивания, мкс	6	5	3	4	600	0,04	2
Послесвечение через 3 мс, %	20	0,1	0,2	0,1	1	0,5	0,1

Для технической дефектоскопии, в которой допустимы большие флюэнсы высокоэнергетических рентгеновских квантов, необходимо применять люминофоры высокой плотности и с большим атомным номером, такие как CdWO₄, ZnWO₄, Lu₂SiO₅:Ce, Gd₂O₂S:Tb (см. табл. 1). Для ряда люминофоров, которые не разлагаются при плавлении (CdWO₄, ZnWO₄, Lu₂SiO₅:Ce), возможно получение экранов в виде кристаллов. Оксисульфиды применяются в виде монодисперсного порошка, распределенного в полимерном связующем, или в виде керамики. Для сцинтилляционных веществ, приведенных в таблице, характерны высокая радиационная стойкость, удовлетворительные кинетические параметры (кроме Gd₂O₂S:Tb), удовлетворительное согласование со спектром чувствительности кремниевых фотоприемников для ZnSe:Al, Gd₂O₂S:Tb, Gd₂O₂S:Pr,Ce,F.

Особенности применения композитных сцинтилляторов в цифровой рентгенографии. В связи с необходимостью дефектоскопии объектов в режиме реального времени с применением видеорегистрации высокого разрешения и развитием мультиспектральных методик регистрации теневых изображений возникли новые требования к параметрам сцинтилляторов. Это ужесточение требований к кинетике люминесценции, симбатный характер изменения световыход с температурой, радиационная стойкость сцинтилляторов не ниже 10⁶ рад. При этом энергетическая зависимость световыхода сцинтилляторов существенно зависит от толщины образца, эффективного атомного номера ($Z_{\text{эфф}}$) и прозрачности к собственному излучению.

На рис. 1. приведены зависимости световыхода керамического и кристаллических сцинтилляторов от анодного напряжения. При 50 кВ максимальный сигнал у селенида цинка толщиной 0,6

мм. С увеличением напряжения анода от 50 до 130 кВ световой выход этого образца практически не изменяется по причине поглощения в нем только низкоэнергетической части рентгеновского сигнала.

Нами были проведены сравнительные испытания разных образцов сцинтилляционных экранов как изготовленных нами, так и выпускаемых промышленностью. Экраны испытывали в диапазоне энергий радиационного излучения от 30 до 120 кэВ. Для сравнения в тех же режимах и для тех же толщин провели тестирование медицинского экрана ЭРС-С-2А. Определяли чувствительность радиационного контроля по канавочному индикатору чувствительности для различных толщин и энергий излучения. В качестве источника рентгеновского излучения использовался рентгеновский аппарат РАП 150/300 с фокусным пятном 3,2 мм, что для рентгенографии не является подходящим. Результаты получены на нашем не серийном обо-

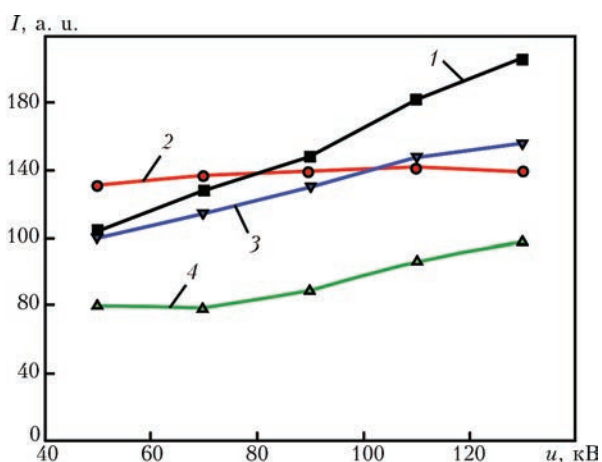


Рис. 1. Зависимость уровня светового выхода керамики: 1 – GOS (2,0 мм); 2 – ZnSe (0,6 мм); 3 – ZnSe (4,0 мм); 4 – CsI(Tl) (4,0 мм), измеренного при постоянном токе рентгеновского излучателя, от варьирования анодного напряжения в диапазоне 50...130 кВ

рудовании (рис. 2) с использованием аппаратного видеопроцессора для статистической обработки теневого рентгеновского изображения методом накопления для фильтрации флуктуационных шумов рентгенотелевизионного канала. Кроме того, видеопроцессор позволяет документировать рентгенограммы в электронном виде. По результатам испытаний и полученным изображениям тест-объектов можно сделать выводы относительно эксплуатационных характеристик работы экранов.

Как показали приведенные ниже результаты испытаний, наиболее эффективным преобразователем теневого рентгеновского изображения в видимое оказался экран № 1 – первый мелкодисперсный сцинтилляционный экран (табл. 2). На втором месте со значительным отставанием по эффективности идет экран ЭРС-С-2А (табл. 3).

Второй экран размывает изображение, т. е. не обеспечивает разрешающую способность. Это связано с высоким коэффициентом рассеивания экрана, что хорошо заметно на рентгенограммах эталона чувствительности при одинаковых параметрах просвечивания.

Обе рентгенограммы получены при одинаковых условиях просвечивания. На рис. 3 четко видны контуры индикатора чувствительности и 6 канавок. Кроме того, на изображении четко видны пятна окислов на металле, что свидетельствует о высокой чувствительности экрана к незначительным изменениям плотности контролируемого изделия.

На рис. 4. видно размытие контура индикатора и практически не видны канавки. Это связано с размытием теневого рентгеновского изображения в

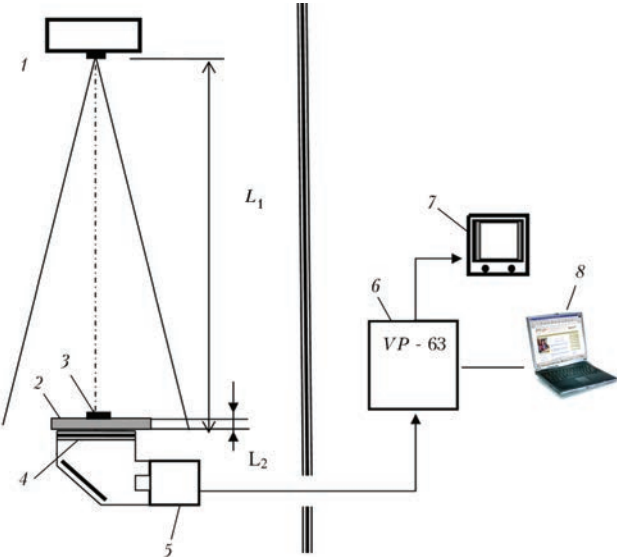


Рис. 2. Схема и состав оборудования для исследования параметров рентгеновских экранов: 1 – источник рентгеновского излучения; 2 – пластина алюминия (толщина изменяется); 3 – индикатор чувствительности Al № 1; 4 – рентгенооптический преобразователь (экран); 5 – телевизионная передающая камера; 6 – видеопроцессор; 7 – телевизионный монитор; 8 – компьютерный блок обработки и архивирования рентгенограмм; L_1 – расстояние от излучателя до образца; L_2 – толщина пластины

структуре самого экрана. Кроме того, более заметна сама структура экрана. Экран под рентгеном светится, но не обеспечивает достаточную разрешающую способность и чувствительность контроля.

Ниже представлены зависимости чувствительности радиационного контроля изделий из алюминия по канавочному индикатору для различных толщин материала и различных энергий ионизирующего излучения при использовании двух типов экранов: № 1 и медицинский ЭРС-С-2А.

Таблица 2. Эффективность преобразования теневого рентгеновского изображения в видимое на мелкодисперсном экране № 1. Просвечиваемый материал – алюминий

Ускоряющее напряжение, кВ	Чувствительность контроля (%) при толщине (мм) контролируемого объекта + толщина индикатора чувствительности(2 мм)					
	5	8	11	14	19	24
30	12	–	–	–	–	–
40	4	6,25	18	–	–	–
50	2	3,75	4,5	4,3	–	–
60	2	2,5	2,7	2,9	10	–
70	1,5	1,5	1,8	2,1	3,1	1,7
80	1,5	1,25	0,9	1,4	1,6	1,7
90	1,5	1,25	0,9	0,7	1	1,3
100	–	2,5	0,9	0,7	1	1,7
110	–	3,75	0,9	0,6	0,5	2
120	–	–	0,9	0,6	0,5	2
130	–	–	1,8	1,4	1	–

Таблица 3. Эффективность преобразования теневого рентгеновского изображения в видимое на медицинском экране ЭРС-С-2А. Просвечиваемый материал – алюминий

Ускоряющее напряжение, кВ	Чувствительность контроля (%) при толщине контролируемого объекта (мм)				
	5	8	11	14	19
30	12	–	–	–	–
40	6	25	18	–	–
50	5	4	3,6	14	–
60	5	3	3,6	2,1	10
70	4	3	2,7	1,4	10
80	3	2,5	1,8	2,1	10
90	2	2,5	1,8	2,1	10
100	4	2,5	1,8	2,1	10
110	–	2	1,8	1,8	3,2
120	–	–	1,8	1,4	3,2
130	–	–	–	1,8	3,2

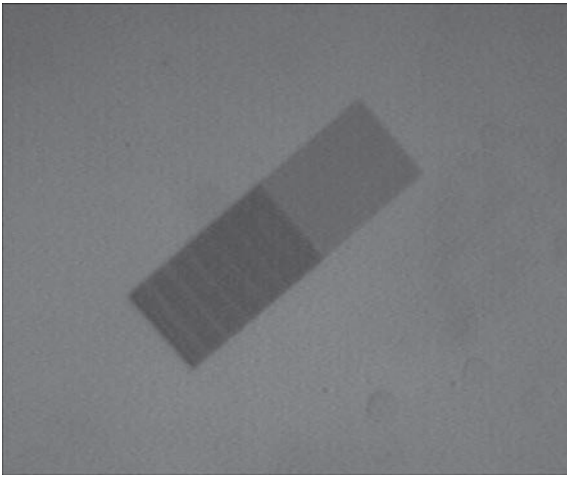


Рис. 3. Рентгенограмма индикатора чувствительности № 1 на алюминии $H = 3$ мм, полученная с помощью первого экрана

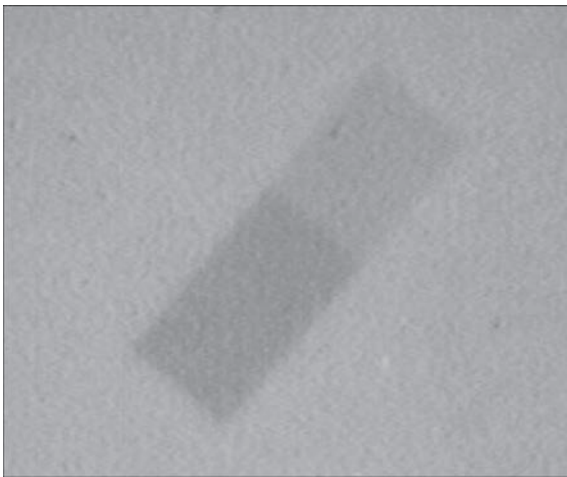


Рис. 4. Рентгенограмма индикатора чувствительности № 1 на алюминии $H = 3$ мм, полученная с помощью второго медицинского ЭРС-С-2А экрана

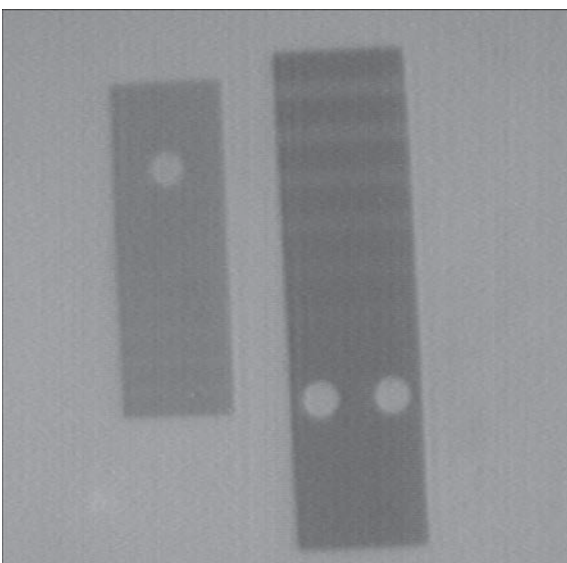


Рис. 5. Рентгенограмма индикаторов чувствительности № 1 и № 2 стали толщиной 4 мм при энергии рентгеновского излучения 140 кЭВ

Приведенные характеристики позволяют оценить эффективность преобразования теневого рентгеновского изображения в видимое экранами, а также определить рабочий диапазон энергий, в котором экран позволяет получить наилучшую чувствительность радиационного контроля качества с недостаточной яркостью свечения экрана и при этом проявляются весьма существенно структурные шумы экрана и ПЗС-матрицы. Верхний предел динамического диапазона определяется насыщением экрана, т. е. при увеличении энергии излучения яркость свечения не увеличивается, что приводит к уменьшению контрастности изображения и потере элементов изображения с малым перепадом плотности. Другими словами, начинают пропадать наименьшие канавки индикатора чувствительности на рентгенограмме.

На рис. 5, приведенном для экрана № 1, четко различимы 5 канавок индикатора № 1, что соответствует чувствительности 3,3 %. На стали толщиной 9 мм при напряжении 140 кЭВ видны 4 канавки индикатора № 1, что соответствует чувствительности 2,7 %.

Полученные результаты позволили при непосредственном участии сотрудников Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины Троицкого В. А. и Бухенского В. Н. создать на основе мелкокристаллического сцинтилляционного экрана промышленную переносную установку для контроля сварных швов (рис. 6).

При выполнении рентгенографических исследований биологических объектов необходимо получать информацию о морфологии (кости скелета, мягкие ткани, сосуды). Основными требованиями, предъявляемыми к изображению, являются высо-



Рис. 6. Внешний вид переносной установки для неразрушающего контроля сварных швов

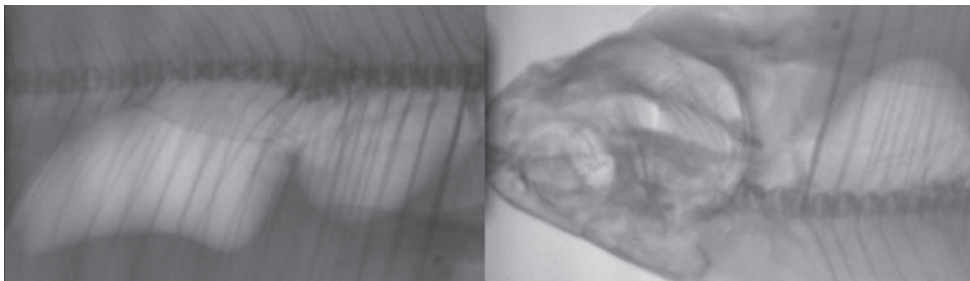


Рис. 7. Изображение биологического объекта, полученное при помощи экрана из ZnSe

кое пространственное разрешение, высокая контрастность в широком динамическом диапазоне и минимальная лучевая нагрузка на пациента.

Экран, изготовленный из мелкокристаллического сцинтилляционного порошка селенида цинка (рис. 7) [8–12] имеет хорошую чувствительность, разрешающую способность и эффективность преобразования теневого рентгеновского изображения в видимое. Данный экран особенно эффективен для визуализации биологических объектов и, как видно из рис. 7, позволяет контрастно различать даже ткань рыбьего пузыря. Оптимальный диапазон энергий такого экрана 30...50 кэВ.

Выводы

1. Изготовлен образец мелкодисперсного экрана на основе ZnSe для применения в радиационных дефектоскопических системах, работающих в диапазоне энергий 50...140 кэВ. Проведенные испытания показали высокую эффективность дефектоскопии металлических индикаторных образцов, высокую разрешающую способность и контрастную чувствительность экрана.

2. Спектральная характеристика излучения экрана хорошо сочетается с характеристикой спектральной чувствительности ПЗС- и КМОП-сенсоров изображения, используемых для преобразования теневого изображения в видеосигнал.

3. На образце изделия из алюминия толщиной 10 мм по канавочному дефектометру была получена чувствительность контроля 1 %, что близко к чувствительности, получаемой с применением пленочной технологии.

4. Показана перспективность применения композитных экранов из селенида цинка при визуализации биологических объектов.

Список литературы

1. Рюдигер Ю. Г. (2004) О применении синей и зеленой систем визуализации изображения в рентгенографии. *Медицинская техника*, **6**, 32.
2. Carel W. E. van Eijk. (2002) Inorganic scintillators in medical imaging. *Physics in medicine and biology*, **47**, 85.
3. (1991) *Физика визуализации изображений в медицине*: в 2-х т. С. Уэбба. (ред.). Москва, Мир.
4. Полойко Ю. Ф. (1998) Цифровая рентгенография – новая эра лучевой диагностики. *Новости лучевой диагностики*, **1**, 31.
5. Ананьева Г. В., Горохова Е. И., Демиденко В. А. (2005) Оптические свойства керамики на основе Gd_2O_3S . *Оптический журнал*, **72**(1), 68.

6. Nikl M. (2006) Scintillation detectors for x-rays. *Meas. Sci. Technol.*, **17**, R37.
7. Weber M. J. (2002) Inorganic Scintillators: Today and Tomorrow. *J. Lumin.*, **100**, 35.
8. Воронкин С. Ф., Галкин С. М., Лалаянц О. И., Лігічевський В. О., Рижигов В. Д. (2013) *Спосіб виготовлення багатоеlementних сцинтиляційних збірок*. Україна, Пат. 101234 від 11.03.2013.
9. Воронкин С. Ф., Галкин С. М., Лалаянц О. И., Лігічевський В. О., Рижигов В. Д. (2013) Сцинтиляційна панель та спосіб її виготовлення. Україна, Пат. 101724 від 25.04.2013 р.
10. Воронкин С. Ф., Галкин С. М., Лалаянц О. И., Рижигов В. Д., Гриньов Б. В., Бреславський І. А. (2009) Напівпровідниковий сцинтиляційний матеріал на основі активованого селеніду цинку та спосіб його одержання. Україна, Пат. 92286 від 29.10.2009 р.
11. Воронкин С. Ф. (2014) Сцинтилляционные экраны на основе селенида цинка и оксидных сцинтилляторов для неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 29–33.
12. Троицкий В. А., Михайлов С. Р., Пастовенский Р. О., Шило Д. С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Там же*, **1**, 23–35.

References

1. Ryudiger Yu. G. (2004) On application of blue and green systems of imaging in radiography. *Meditinskaya Tekhnika*, **6**, 32 [in Russian].
2. Carel, W. E. van Eijk (2002) Inorganic scintillators in medical imaging. *Physics in Medicine and Biology*, **47**, 85.
3. (1991) *Physics of medical imaging*. Ed. by Webb's. Moscow, Mir [in Russian].
4. Polojko, Yu. F. (1998) Digital radiography – a new era of beam diagnostics. *Novosti Luchevoy Diagnostiki*, **1**, 31 [in Russian].
5. Ananieva, G. V., Gorokhova, E. I., Demidenko, V. A. (2005) Optical properties of ceramics based on Gd_2O_3S . *Opticheskij Zhurnal*, **72**(1), 68 [in Russian].
6. Nikl, M. (2006) Scintillation detectors for x-rays. *Meas. Sci. Technol.*, **17**, R37.
7. Weber, M. J. (2002) Inorganic scintillators: Today and tomorrow. *J. Lumin.*, **100**, 35.
8. Voronkin, E. F., Galkin, S. N., Sosnitskaya, O. A. et al. (2013) *Method of manufacture of multielement scintillation assemblies*. Pat. Ukraine 101234. 11.03.2013 [in Ukrainian].
9. Voronkin, E. F., Galkin, S. N., Lalayants, A. I. et al. (2013) *Scintillation panel and method of its producing*. Pat. Ukraine 101724. 25.04.2013 [in Ukrainian].
10. Voronkin, E. F., Galkin, S. N., Ryzhikov, V. D., Lalayants, O. I. et al. (2009) *Semiconducting scintillation material based on alloyed ZnSe and methods to produce it*. Pat. Ukraine 92286, 29.10.2009 [in Ukrainian].
11. Voronkin, E. F. (2014) Scintillation screens based on zinc selenide and oxide scintillators for NDT *Tekhn. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 29–33 [in Russian].
12. Troitsky, V. A., Mikhajlov, S. R., Pastovensky, R. O. et al. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Ibid.*, **1**, 23–35 [in Russian].

Е. Ф. ВОРОНКИН¹, Р. О. ПАСТОВЕНСЬКИЙ²

¹Інститут сцинтиляційних матеріалів, НТК «Інститут моно-

кристалів» НАН України. 61001, м. Харків, пр-т Науки, 60.
E-mail: voronkin@isma.kharkov.ua
²ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул.
Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

ЦИФРОВА РЕНТГЕНОГРАФІЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМПОЗИТНИХ ЕКРАНІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОН- ТРОЛЮ В ПРОМИСЛОВОСТІ ТА МЕДИЦИНІ

Показана можливість застосування дисперсних сцинтиляторів великої площі для дефектоскопії виробів з металу, натомість рентгенівської плівки, на основі сцинтиляційних екранів ZnSe:Al, що характеризуються максимумом люмінесценції в області фотопоглинання селеніду цинку. Наведено експериментальні дані про залежність поглинання рентгенівського випромінювання зразками з використанням сцинтиляційних екранів на основі халькогенідного сцинтилятора селеніду цинку і ЕРС-С-2А від товщини зразка за прискорюючої напруги. Показана перспективність застосування композитних екранів з селеніду цинку при візуалізації біологічних об'єктів, що свідчить про можливість використання цих екранів в томографічних медичних системах. Бібліогр. 12, табл. 3, рис. 7

Ключові слова: неруйнівний контроль, сцинтиляційні екрани, дефектоскопія

DIGITAL RADIOGRAPHY WITH USE OF COMPOSITE

SCREENS FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING IN INDUSTRY AND MEDICINE

E. F. VORONKIN¹, R. O. PASTOVENSKY²

¹Institute of Scintillation Materials, STC «Institute of Monocrystals», NAS of Ukraine,
60, Nauky ave., 61001, Kharkov, Ukraine
E-mail: voronkin@isma.kharkov.ua

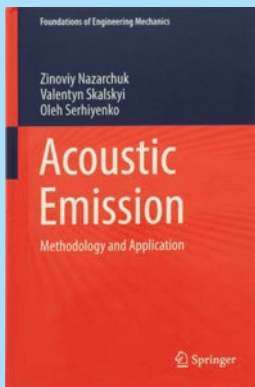
²E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
11 Kazimir Malevich str., 03150, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

The possibility of using dispersed scintillators of a large area for flaw detection of metal products instead of an X-ray film based on scintillation screens ZnSe:Al, characterized by a maximum of luminescence in the area of photoabsorption of zinc selenide, is shown. The experimental data on the dependence of X-ray absorption by specimens using scintillation screens based on the chalcogenide scintillator of zinc selenide and ERS-S-2A on the thickness of a specimen at accelerating voltage are presented. The prospects of applying composite screens of zinc selenide during visualization of biological objects is shown, which indicates the possibility of using these screens in tomographic medical systems. 12 – Ref., 3 – Tab., 7 – Fig.

Keywords: non-destructive testing, scintillation screens, flaw detection

Поступила в редакцію
06.07.2017

НОВА КНИГА



Nazarchuk Z., Skalskyi V., Serhiyenko O.
Acoustic emission. Methodology and Application. – Springer
International Publishing AG, 2017. – XIV, 283 p.

У монографії детально проаналізовано 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.

THE HELLENIC SOCIETY OF NDT (HSNT)
National Non Profit Society, Member of EFNDT and ICNDT
&

THE WELDING GREEK INSTITUTE (WGI)
National Non Profit Institute, Member of EWF and IIW

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



22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

ОЦІНКА РИЗИКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ПІДСТАВІ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ І ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ МЕТОДАМИ НК І ТД

Ю. К. БОНДАРЕНКО, О. В. КОВАЛЬЧУК

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

Визначені особливості побудови системи управління якістю зварювального виробництва згідно нової редакції ISO 9001:2015 на основі розробки процесів системи з позицій ризик – орієнтованого підходу. Більш детальне технічне регулювання і контроль зазнають ті процеси системи, які суттєво впливають на якість зварних конструкцій і які можуть містити підвищену величину ризику. В роботі визначені особливості ризику в зварювальному виробництві, пов'язані з призначенням відповідальної конструкції, з особливостями виробництва – наявністю «спеціального» процесу зварювання, персоніфікованими роботами по технічній експертизі, зварюванню, неруйнівному контролю, невизначеністю результатів випробувань та аудиту. Наведені міжнародні нормативні документи, які визначають вимоги до організації вказаних процесів і проведення неруйнівного контролю. За результатами проведених аудитів системи управління підприємств зварювального виробництва і отриманих даних випробувань в акредитованій випробувальній лабораторії ІЕЗ визначено характер впливу рівня управління якістю на якість і ризик продукції. Дослідження і управління ризиком на основі методології стандарту ISO/IEC 31000 слугує для попередження негативних результатів виробництва, пов'язаних з дефектністю зварних конструкцій, можливими аваріями, шкідливими впливами, проте і виявляє приховані можливості для його вдосконалення. Бібліогр. 12, рис. 6.

Ключові слова: ризик, менеджмент ризику, оцінка ризику, якість зварної конструкції і технологічних процесів зварювання, вдосконалення системи управління якістю зварювального виробництва

Необхідність підвищення ефективності діяльності підприємства (збільшення продуктивності, зменшення витрат, поліпшення якості) змушує розробляти ефективні методи управління і впроваджувати вимоги стандартів системи якості, переходячи від контролю готової продукції (поетапного контролю, як одного з методів технічного забезпечення функціонування) до процесного підходу управління. Вимоги стандартів системи управління якістю розвиваються відповідно до вимог розвитку суспільства і розвитку наукових методів управління. Сімейство стандартів системи менеджменту нового покоління, до якого відносяться і ISO 9001:2015, є стандартами структури високого рівня. Термін структура високого рівня введено керівництвом ISO Guide 83:2011 і застосовується до стандартів системи менеджменту, які мають ідентичні вимоги, терміни, ключові визначення і використовують концепцію ризик-орієнтованого мислення.

Дослідження показали, що підприємства чи лабораторії стикаються з низкою ризиків, які можуть впливати на досягнення цілей в сфері якості, безпеки зварної конструкції. Ризик – це вплив невизначеності на цілі [1]. Вплив розглядається як відхилення з позитивними і негативними наслідками. Цілі на виробництві можуть мати різні аспекти і можуть відноситись до різних рівнів

управління (таких як стратегічний рівень, організаційний, рівень проекту, продукції, процесу). Ризик експлуатації часто характеризується посиленнями на потенційно можливі події (аварії) і наслідки або їх комбінації. Ризик часто виражається в комбінації події і пов'язаної з нею імовірності інцидентів (аварій). Невизначеність – це також стан часткової відсутності інформації відносно розуміння чи знання подій, їх наслідків або імовірності [1].

Оцінка ризику є загальним процесом ідентифікації ризику, аналізу ризику і виявлення ступеню ризику в зварній конструкції. Рівень ризику – величина ризику, виражена в комбінації наслідків і їх імовірності виникнення дефектів при виробництві і експлуатації зварної конструкції. Критерії ризику – дані, за якими оцінюється значущість ризику. Визначення ступеню ризику – процес порівняння результатів аналізування ризику з критеріями ризику для визначення того, чи можна прийняти величину ризику в кожній зварній конструкції. Неруйнівний контроль – вимірювання, здатне змінити ризик [1].

Дослідження показали, що кожен процес системи управління якістю зварювального підприємства виконує як «корисну роботу» – здійснює діяльність по перетворенню вхідних показників якості на вихідні і розглядається з позицій створення додаткових цінностей, так і несе в собі не-

© Ю. К. Бондаренко, О. В. Ковальчук, 2017

визначеності (ризик), які впливають на отримувані вихідні показники [2]. При цьому будь-яка невизначеність при випробуванні може мати позитивний чи негативний результат. Позитивний результат, зумовлений відхиленням, може забезпечувати певну можливість і в цьому «прихований» додатковий ресурс для зварювального підприємства, проте не всі позитивні впливи ризику ведуть до можливостей при виготовленні зварної конструкції [2].

Негативний результат спонукає до управління ризиком. З цією метою необхідно, по-перше, інженерному персоналу підприємства (керівнику зварювальних робіт, керівнику лабораторії з НК і ТД) мати знання про ризик: ідентифікувати джерела ризику, визначити природу ризику і рівні ризику (провести аналіз ризику). По-друге, визначити ступінь ризику шляхом порівняння результатів аналізу ризику з критеріями ризику для визначення того, чи можна прийняти величину ризику. За необхідності, провести обробку ризику (включаючи модифікацію ризику) (рис. 1).

З метою зменшення ризику модифікація може включати: знешкодження джерела ризику, зміну ймовірності, зміну наслідків, розподіл відповідальності між іншими процесами або виконавцями процесів [3].

Аналіз показав, що при впровадженні системи управління виробництвом на основі стандарту ISO 9001:2015 рівень регулювання процесами (деталізація вимог системи, додаткові управлінські дії, обсяг вимірювань та неруйнівного контролю, навчання та атестація персоналу) пропорційний ступеню ризиків, пов'язаних з ними. Це дає підприємству можливість сконцентрувати зусилля та кошти на тих ділянках технологічного процесу, де ймовірність виникнення відмов найбільша і не загрузнути в управлінні другорядними процесами. Натомість процеси управління ризиками, згідно методології стандартів ISO 9001:2015 та

ISO 31000:2009, мають стати частиною процесів підприємства і бути інтегровані в загальну систему управління зварювального виробництва та експлуатації конструкцій.

При ідентифікації джерел ризиків враховується сфера діяльності організації зварювального виробництва (контекст організації), тип виробництва, випробувальної лабораторії з НК і ТД. Процес керування ризиками допомагає приймати рішення з урахуванням невизначеності та можливості настання майбутніх подій чи обставин і їх впливів на цілі організації в сфері якості і безпеки.

Відзначимо особливості ризиків зварювального виробництва і, як наслідок, системи управління, в тому числі, вимог щодо вимірювань та обсягів контролю з НК і ТД.

Перша група – це ризики, пов'язані з виробництвом та ремонтом відповідальних конструкцій, на які поширюються вимоги Технічних регламентів [5]. В цьому випадку вимоги до управління виробництвом, обсягу контролю відносяться до законодавчо регульованої сфери і мають бути не менш жорсткі, ніж визначені законодавством. Так, «Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд», до якого може бути віднесена частина зварних конструкцій, вимагає контроль виробництва з боку виробника по модулю A та D , підтвердження відповідності продукції по модулю $B+D$ або F з боку призначених органів з оцінки відповідності [5].

Стандарти серії EN 1090 «Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій» визначають залежність класу виготовлення конструкцій від ризиків, які з нею пов'язані. Так, стандарт EN 1090-2 Частина 2 «Технічні вимоги до сталевих конструкцій» встановлює чотири класи виготовлення, які позначаються як EXC 1...EXC 4 («EXC» – execution). При цьому жорсткість вимог зростає від EXC 1 до EXC 4. Вибір класу виготовлення здійснюється з врахуванням вирішальних факторів виконання, які впливають на загальну надійність споруд. Так, EN 1090-2 (додаток B) визначає наступні три вирішальні фактори: класи наслідків в залежності від диференціації надійності; ризики, пов'язані з виготовленням конструкції; ризики, пов'язані з використанням конструкції. З метою класифікації конкретної конструкції необхідно визначити критерії для виробничих категорій та категорій використання.

Друга група – це ризики, пов'язані з наявністю спеціального процесу. До спеціальних процесів відносяться технологічні процеси, якість яких формується протягом виконання і не може бути забезпечена результатами заключного контролю (іншими словами це процеси, якими важко управляти). До них відносяться процеси зварювання та

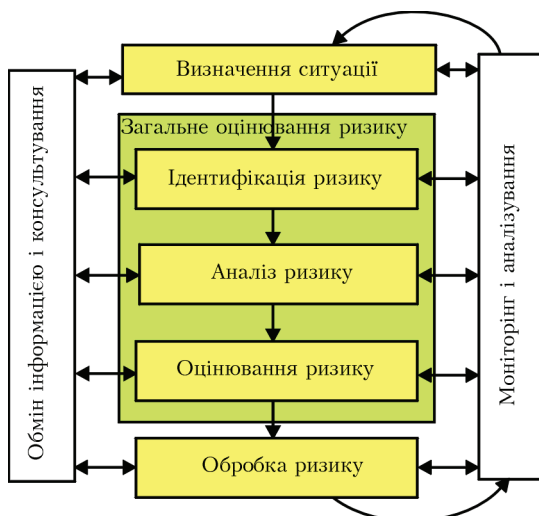


Рис 1. Вхідні дані процесу керування ризиком [3, 4]

термооброблення. Дійсно, при наявності дефектів, які не можуть бути виправлені (тріщини, несуцільності, тощо) зварне з'єднання бракується. При ремонті трубопроводу, наприклад, заміна одного стикового зварного шва вимагає зварювання котушки, що збільшує вартість ремонту мінімум вдвічі. Величина ризику для виробника в цьому випадку дорівнює добутку імовірності виникнення браку на величину збитку (вартості повного обсягу зварювальної роботи) [6].

Аналіз показав, що вимоги щодо деталізації управління зварювальними процесами та організацією контролю при зварюванні визначаються сімейством стандартів ISO 3834. Ці стандарти регламентують вимоги до менеджменту при зварюванні, обсяг і організацію контролю, зокрема з НК і ТД, необхідні процедури. Серія стандартів ISO 3834 складається з шести частин, об'єднаних загальною назвою «Вимоги до якості виконання зварювання плавленням металевих матеріалів»: Частина 1 «Критерії вибору відповідного рівня вимог до якості»; Частина 2 «Всебічні вимоги до якості»; Частина 3 «Типові вимоги до якості»; Частина 4 «Елементарні вимоги до якості»; Частина 5 «Документи, вимоги яких необхідно задовольняти для того, щоб підтвердити відповідність вимогам ISO 3834-2, ISO 3834-3 або ISO 3834-4»; Частина 6 «Керівництво по впровадженню ISO 3834 (Технічний звіт)».

Стандарт EN 1090-2 містить вказівки по застосуванню частин стандартів ISO 3834 в залежності від необхідного класу виготовлення конструкцій: при класі виготовлення EXC1 слід застосовувати Частину 4 ISO 3834; EXC2 – відповідно Частину 3; EXC3 і EXC4 – Частину 2. Таким чином, клас конструкцій диктує вимоги до рівня деталізації процесів управління якістю зварювального виробництва, а також обсягу застосування НК і ТД.

При аналізуванні вимог стандартів ISO 3834 щодо виконання неруйнівного контролю встановлено, що при зварюванні відповідальних конструкцій, на які поширюється ISO 3834-2, ISO 3834-3, необхідно: вимоги до контролю включати в документований процес планування виробництва і контролю виробничої діяльності; мати плани контролю; процедуру контролю. Також в стандарті ISO 3834-5 (додаток А) визначаються кваліфікаційні вимоги до фахівців, які здійснюють НК.

Всебічні та типові вимоги до якості зварювання вимагають від виробника зварних конструкцій: впровадження системи ідентифікації зварних з'єднань; розробку та виконання плану зварювання (EN 1090-2); технологічні інструкції для зварювання – WPS (welding procedure specification) згідно відповідних частин стандартів ISO 15609; інструкції з термооброблення зварних з'єднань (за необхідності згідно ISO/TR 17663); атеста-

ції технології зварювання згідно стандартів серії ISO 15614. Необхідно впровадити систему підготовки та атестації зварників та операторів-зварників (стандарти серій ISO 9606, ISO 15618, стандарт ISO 14742), та персоналу з НК і ТД згідно EN ISO 9712 [7]. Особливо важливим є забезпечення зварювальних робіт інженерним висококваліфікованим персоналом для координації зварювальних робіт (ISO 14731) та керування зварювальними роботами (кваліфікаційні вимоги – ISO 3834-5, додаток А). Всі ці заходи є методами обробки ризику в зварювальному виробництві.

Третя група ризиків пов'язана з наявністю в зварювальному виробництві персоніфікованих робіт (процесів). Це такі роботи, в яких якість виконання на 80...100 % залежить від кваліфікації, компетентності і відповідальності виконавців. В галузі зварювання це інженерний персонал (керівники, координатори зварювальних робіт), спеціалісти ручного дугового зварювання і спеціалісти з проведення неруйнівного контролю та технічної діагностики. Так, на фахівця з неруйнівного контролю «лягає відповідальність» по ідентифікації статусу компонентів зварної конструкції: чи є вони відповідними вимогам нормативного документу та технічному завданню, чи є бракованими. Величина наслідків ризику (втрат) у випадку видачі недостовірного протоколу фахівцем з НК і ТД для виробника може бути сумірна з затратами на виготовлення, гарантійне обслуговування та ремонт. Для споживачів вона пов'язана з втратами від аварій, тощо. Тому необхідно зменшити вірогідність невідповідної діяльності з НК і ТД і збільшити достовірність результатів вимірювання. Такі додаткові заходи управління персоналом зі зварювання, НК і ТД, як організація періодичного навчання, атестація, сертифікація, наглядання за проведенням робіт з НК і ТД є необхідними з точки зору методології управління ризиком.

Беручи до уваги методології сучасного управління, наприклад, стратегічного управління збалансованою системою показників BSC (Balance, score, card) діяльності організації [8], для забезпечення сталого розвитку підприємства робота з персоналом, який відповідає за ключові процеси утворення якості, має включати такі заходи, як мотивація, заохочення. Разом з тим головний зварник та фахівець з НК і ТД мають бути ознайомлені з політикою і цілями в сфері якості підприємства і мають розуміти, як їх діяльність впливає на виконання конкретних цільових завдань і стратегічних показників. Такі заходи управління, як мотивація, впровадження системи підвищення кваліфікації слугуватимуть тому, що знання кожного спеціаліста стануть корпоративними знаннями і сприятимуть створенню корпоративної культури в

цілому, підвищенню відповідальності за своєчасне якісне виконання виробничих завдань.

Робота фахівців з неруйнівного контролю тісно пов'язана з роботою випробувальної лабораторії підприємства.

Четверта група – ризики, пов'язані з моніторингом та вимірюваннями. Кожне підприємство, яке впроваджує у себе систему управління має організувати систему моніторингу та вимірювань як показників процесів, так і контроль продукції на визначених етапах життєвого циклу (вхідний контроль, операційний, вихідний контроль готової продукції, діагностика експлуатаційних характеристик). Організація випробувань в випробувальній лабораторії (ВЛ) має відповідати міжнародному стандарту ISO/IEC 17025 [9]. На рис. 2 зазначені фактори, які впливають на результати випробувань.

Впровадження якісного управління та контролю за цими процесами (згідно стандарту ISO/IEC 17025) допоможе спрогнозувати та зменшити результуючий ризик випробувань, що пов'язаний з невизначеністю вимірювання.

Невизначеність вимірювання – це параметр, що пов'язаний з результатом вимірювання і характеризує розсіювання значень, котрі обґрунтовано могли б бути приписані вимірюваній величині [10, 11].

Крім традиційних процесів управління в лабораторії, таких, як управління випробувальним обладнанням, документацією, навколишнім середовищем впроваджуються і методи, притаманні саме організації випробувань, зокрема з НК і ТД. Оцінювання якості результатів випробування забезпечується шляхом виконання повторних, дублюючих, міжлабораторних випробувань.

Ця діяльність здійснюється з запланованою періодичністю таким чином, щоб результат кожного методу випробування був оцінений і порівняний з іншим результатом, як мінімум, один раз протягом встановленого лабораторією терміну (але не більше ніж рік). Результати отриманих випробувань (неруйнівних та руйнівних) слугують для аналізу якості діяльності ВЛ. Впроваджується система валідації методів в ВЛ.

Аналіз нормативних документів показав, що в порівнянні зі стандартом ДСТУ 3412-96, в ДСТУ ISO/IEC 17025 відрізняються вимоги до протоколів. Так, протокол може містити думки та тлумачення випробувача, пов'язані з отриманими ре-

зультатами, які не відображені в замовленні на випробування, але які він вважає за суттєві, і які можуть бути втрачені при подальшому управлінні випробуванням зразком чи частиною конструкції.

У випадку порушення процесу випробувань відповідальна особа лабораторії може прийняти рішення про продовження чи припинення випробувань, прийняття або неприйняття результатів випробування (провести аналіз ризику і оцінити ступінь ризику). Проте дані про всі відхилення процесу випробування, прийняті рішення і прізвища відповідальних осіб, дозволи на поступку повинні бути задокументовані, підписані та затверджені. Ця документована інформація може бути використана для подальшого повторного аналізування ризику випробувань та якості конструкції.

Іншим методом вимірювання є аудити. Основні ризики, які можуть бути притаманні аудитам – недостатність компетентності персоналу з перевірки в конкретній галузі (в тому числі в методах проведення НК і ТД для зварювального виробництва), суб'єктивність оцінки, вибірковість об'єктів перевірки. Проведення аудиту є також персоніфікованою роботою, тому розробленню методології виконання аудитів завжди приділялась велика увага як в міжнародній організації зі стандартизації ISO (еволюція стандартів від минулої серії ISO 10011 до ISO 19011, видання нових редакцій ISO/IEC 17021), так і безпосередньо на підприємствах. Методика проведення внутрішнього аудиту підприємства, яка враховує його специфіку, є обов'язковою для впровадження в рамках системи управління якістю.

Таким чином, аудити та випробування руйнівним контролем та методами НК і ТД щодо ризику мають двоїсту властивість з однієї сторони несуть в собі невизначеності і пов'язані з ними ризики, з іншої є методами вимірювань, за результатами яких можна визначити шляхи вдосконалення системи і зменшення ризиків. Підвищення достовірності методів вимірювань в порівнянні з попередніми їх виконаннями може виявити ресурс поліпшення, про який було невідомо досі і зменшити величину рівня ризику прийнятного на даний час для організації і покращити якість продукції в цілому (наприклад, Система 6 σ) [12].

В ході виконання обстежень технічних можливостей організацій, які виконують зварювальні роботи та контроль спеціалістами ІЄЗ ім. Є. О. Патона НАН України були проведені аудити виробництва щодо виконання технологічних процесів зварювання (рис. 3). Серед них: № 1 – підприємство, яке випускає будівельні металоконструкції; № 2 – підприємство, що випускає обладнання з енергетики; № 3 – ремонтний підрозділ ТЕЦ; № 4 – підприємство, яке здійснює монтаж мостових будівельних конструк-

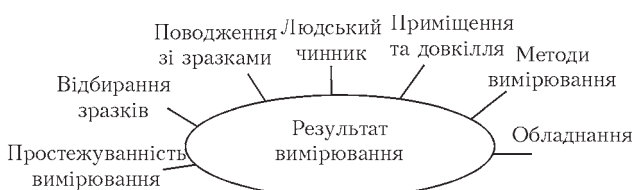


Рис. 2. Фактори, що впливають на результат вимірювання

цій; № 5 – ремонтний підрозділ хімічного комбінату; № 6 – ремонтний завод збагачувального комбінату; № 7 – ремонтний підрозділ хімічного комбінату; № 8 – підприємство теплових мереж; № 9 – підприємство, що випускає парові та водогрійні котли. Методологія аудиту відповідала ДСТУ 3957 з врахуванням вимог ISO 9001. Оцінювались такі елементи системи якості виробництва як: документація, в тому числі розроблення нормативної, конструкторської, технологічної (WPS) документації підприємства; підготовка та атестація персоналу; управління обладнанням; виконання процесів виробництва і виконання зварювання; організація системи контролю та випробувань. Вимоги до показників процесів визначались нормативними документами (НД) ISO 3834, ДСТУ 3951.3, ISO 14731, ISO 15614, технічними умовами на виготовлення та експлуатацію (в частині ремонту) конкретних типів конструкцій.

Для вивчення результатів аудитів (вимоги стандарту ISO/IEC 17021) була запропонована класифікація невідповідностей (ранжування): значна – системна повторювана невідповідність, що зменшує відповідність елементу системи на 50 %; середня – несистемна повторювана на 15 %; поодинокі невідповідності (зауваження), на 5 %. Також на підприємствах були відібрані контрольні зварні з'єднання виконаних технологічних процесів та продукції, та були доставлені в акредитовану в Національному агентстві з акредитації України (НААУ) випробувальну лабораторію ІЕЗ, де за розробленими конкретними програмами (з врахуванням ТУ на продукцію) був проведений комплекс неруйнівних і руйнівних випробувань. По кожному підприємству було розраховано відношення кількості отриманих невідповідних (бракованих) з'єднань до загальної кількості випробуваних зразків підприємства, інакше – величину ймовірності виникнення невідповідностей, що співвідноситься з ризиком.

В літературних джерелах залежність рівня ризику від факторів, що на нього впливають, рекомендують розраховувати як сумарну функцій впливу i -го фактора

$$R = b_0 + \sum_{i=1}^k f_i^{L_i}(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1)$$

де b_0 – початковий рівень ризику, який не залежить від функції регресії; f_i – функція впливу i -го фактора; k – кількість функцій; L_i – ступінь функції.

Дослідження показали, що при відсутності великого набору статистичних даних рекомендується кожен фактор ризику оцінювати в системі бальних оцінок [6]. Якщо вплив кожного з перелічених вище факторів прийняти за одиницю, то доцільно побудувати графік (рис. 3) вірогідності бракованих з'єднань в випробуваній партії під-

приємства (ризик R_i) в залежності від загального рівня системи управління (усереднений показник відповідності всіх елементів системи на даному підприємстві).

Аналізуючи діаграму встановлено, що при зменшенні рівня відповідності елементів системи на 20 %, починається різке зниження якості готової продукції, а при рівні відповідності елементів 50 % вимогам НД якість зварних з'єднань падає до 0, а ризик відповідно збільшується до 1, незважаючи на те, що підприємство має всі основні технічні ресурси.

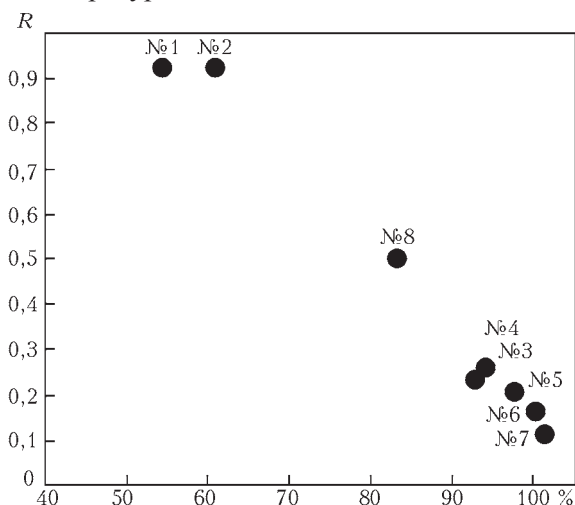


Рис. 3. Результат аналізу стану зварювального виробництва за ДСТУ 3957; R – ймовірність виникнення браку в партії (ризик)

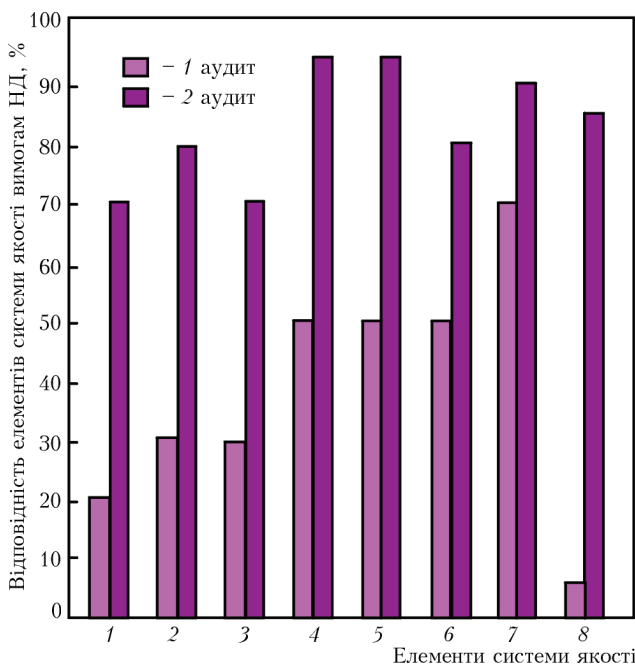


Рис. 4. Результати проведення першого та другого обстеження елементів системи якості на відповідність заданим вимогам (ДСТУ 3957) підприємства, що випускає будівельні конструкції: 1 – документація; 2 – управління процесами виробництва; 3 – контроль та випробування; 4 – виробниче обладнання; 5 – коригувальні дії; 6 – підготовка персоналу; 7 – управління навколишнім середовищем; 8 – відповідність зварних з'єднань вимогам НД

За результатами обстеження стану зварювальних виробництв експертною групою спеціалістів ІЕЗ проаналізовані причини та оцінені можливі наслідки невідповідностей функціонування процесів. За результатами аналізування розроблено коригувальні дії, а на деяких підприємствах – довгострокові програми якості. Коригувальні дії системи якості зварювальних підприємств стосувались доопрацювання технологічної документації та документації системи управління, навчання персоналу, атестації технології зварювання, організації метрологічного забезпечення, діяльності випробувальної лабораторії. На гістограмі (рис. 4) показано стан елементів системи управління за результатами обстеження згідно ДСТУ 3957 підприємства, що випускає будівельні конструкції. Час між аудитами складав приблизно два роки. Результативність досягнення цілей в сфері якості оцінювалась на підставі випробувань в акредитованій випробувальній лабораторії ІЕЗ. Повторні випробування методами НК і ТД та контрольні руйнівні випробування показали, що 85 % з'єднань в партії відповідали вимогам НД. Були розроблені подальші заходи підвищення якості виробництва на підприємстві.

На рис. 5 показано підвищення якості зварювального виробництва на прикладі процентної кількості відповідних контрольних з'єднань до загальної кількості в партії з'єднань підприємств № 1, № 3, № 9, які були відібрані при проведенні першого та наступного аудитів після виконання коригувальних дій та заходів з підвищення якості.

Заходи з удосконалення зварювального виробництва здійснювались за рахунок ресурсів підприємства, часто без залучення значних коштів.

Як видно з діаграм, проводячи аудити і контрольні випробування на підприємствах вперше, аудиторська група стикнулася з критично низьким рівнем якості продукції. Фахівці підприємств не припускали, що виготовляють брак. Коригувальні дії включали: розробку та доопрацювання технологічних інструкцій зі зварювання; доукомп-

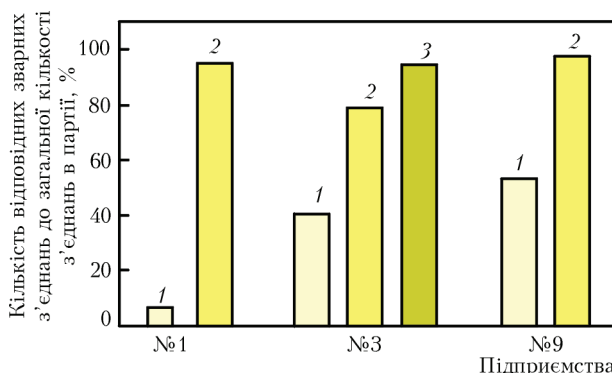


Рис. 5. Підвищення рівня відповідності партій контрольних зварних з'єднань заданим вимогам НД після впровадження коригувальних дій за результатами обстеження. 1 – 3 – порядкові номери аудитів. Тривалість часу між аудитами приблизно 2 роки

лектування необхідними засобами вимірювальної техніки (ЗВТ), посилений контроль за правильним зберіганням і підготовкою електродного матеріалу, ідентифікацію основного і зварювального матеріалу при передачі на виробництво вузлів; ведення необхідної документації зі зварювання (журналу зварювальних робіт або ремонту), дотримання і контроль ЗВТ режимів зварювання, періодичний внутрішній контроль атестованого персоналу зі зварювання та НК і ТД. Велике значення приділялось вимогам повноти проведення контролю та випробувань. На підприємствах був відсутній повний обсяг контролю, який вимагався НД (наприклад, для сталевих будівельних конструкцій ударна в'язкість при негативній температурі), порушувалась його періодичність або якість робіт з випробувань (наприклад застосовувались еталони меншої чутливості для радіографічного контролю). Всі ці невідповідності були усунуті.

Згідно сфери діяльності підприємства № 1, № 3, № 9 випускають відповідальні зварні конструкції. Звичайно, в цьому випадку всі зварні з'єднання мають бути відповідними НД. Для конкретних компонентів зварних конструкцій дефекти, що виявляються при проведенні НК, мають знаходитись в межах рівня прийнятності по ISO 5817:2014 (як визначено технічними умовами на конструкцію). Величина ризику виникнення браку має теоретично наближатись до нуля.

Проте така концепція не адекватна законам техносфери і забезпечити нульовий ризик в діючих технологічних системах неможливою. Навіть після проведення заходів з обробки наявний залишковий ризик. Неможливість досягнення виробничої безпеки спричиняє введення поняття соціально прийнятного (допустимого) ризику. Так визначають стан безпеки, якого можна досягнути по технічним і економічним міркуванням на сучасному етапі науки і техніки. При експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки цільовий показник індивідуального ризику працівника має наближатись до рівня ризику людини в звичайному житті від впливів природних факторів.

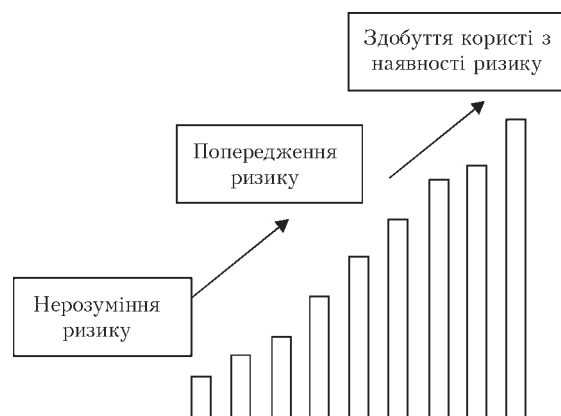


Рис. 6. Рівні розвитку культури керування ризиком

Як було визначено, моніторинг та вимірювання процесів системи управління на зварювальному підприємстві, контроль продукції (зокрема методами НК і ТД) протягом життєвого циклу, ідентифікація і аналіз ризику дають можливість виявити напрямки удосконалення виробництва з метою підвищення якості зварних конструкцій (рис. 6).

Висновки

1. Аналіз та дослідження системи управління якістю показали, що впровадження системи забезпечення якості на зварювальному підприємстві на основі ДСТУ ISO 9001:2015 та міжнародних стандартів для зварювання суттєво зменшує ризик при експлуатації зварної конструкції.

2. Застосування системи моніторингу стану технологічних процесів та вимірювання показників якості дає змогу отримати інформацію про ризик при виробництві і експлуатації зварної конструкції та визначити можливості вдосконалення зварювального виробництва.

3. З метою забезпечення якості зварних металоконструкцій необхідна атестація технології зварювання згідно ДСТУ ISO 15610 – ДСТУ ISO 15614, впровадження системи управління згідно ДСТУ 9001:2015, контроль виробництва та підтвердження відповідності зварних конструкцій за ДСТУ Б EN 1090, а також сертифікація персоналу: зі зварювання за ДСТУ ISO 9606, ДСТУ ISO 14732 та ін. та дефектоскопістів з НК і ТД за ДСТУ ISO EN 9712.

Список літератури

1. ISO Guide 73:2009 *Керування ризиками. Словник термінів*.
2. Потап'євський А. Г., Бондаренко Ю. К., Логінова Ю. В., Артюх К. О. (2016) Технологічне управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів у зварювальному виробництві. *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 4, 56–61.
3. ДСТУ ISO 31000:2014 (ISO 31000:2009, IDT) *Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки*.
4. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). *Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику*.
5. *Постанова КМУ від 13.01.2016 № 95 «Про затвердження модулів оцінки відповідності, які використовуються для розроблення процедур оцінювання відповідності та правил використання модулів оцінювання відповідності»*.
6. Віткін Л., Лапач С. (2007) Як визначити ступінь небезпеки продукції. *Стандартизація, сертифікація, якість*, 3, 48–54.
7. ДСТУ EN ISO 9712:2014 (EN ISO 9712:2012, IDT) *Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю*.
8. Каплан Р. С., Нортон Д. П. (2003) *Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию*. Москва, ЗАО «Олимп-Бизнес».
9. ДСТУ ISO/ІЕС 17025:2006. *Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій*.
10. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. *Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений»*.
11. EUROLAB Technical Report 1/2006. *«Guide to the Evaluation of Measurement Uncertainty for Quantitative Test Results»*. www.eurolab.org.

12. Ватсон Г. (2006) *Методология «Шесть сигм» для лидеров, или как достичь 3,4 дефекта на миллион возможностей*; пер. с англ. А. Л. Раскин, Ю. П. Адлер (ред.). Приложение к журналу «Стандарты и качество». Москва, РИА.

References

1. ISO Guide 73:2009: *Risk management. Dictionary of terms* [in Ukrainian].
2. Potapievsky, A. G., Bondarenko, Yu. K., Loginova, Yu. V. et al. (2016) Technological control of quality and service properties of products in welding production *Tekhn. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, 4, 56–61 [in Ukrainian].
3. DSTU ISO 31000:2014 (ISO 31000:2009, IDT) *Risk management. Principles and guidelines* [in Ukrainian].
4. DSTU IES/ISO 31010:2013 (IES/ISO 31010:2009, IDT) *Risk management. Methods of general evaluation of risk* [in Ukrainian].
5. *Decree of Cabinet of Ministers of Ukraine of 13.01.2016, no 95: Approval of modules of conformity evaluation applied in development of conformity evaluation procedures and rules for using modules of conformity evaluation* [in Ukrainian].
6. Vitkin, L., Lapach, S. (2007) How to determine the degree of hazard of products. *Standartyzatsiya, Sertyfikatsiya, Yakist*, 3, 48–54 [in Ukrainian].
7. DSTU EN ISO 9712: 2014 (EN ISO 9712:2012, IDT): *Non-destructive testing. Qualification and certification of nondestructive testing personnel* [in Ukrainian].
8. Raplan, R.S., Norton, D.P. (2003) *Balanced system of indicators. From strategy to action*. Moscow, CJSC Olimp-Biznes.
9. DSTU ISO/IES 17025:2006. *General requirements to competence of testing and calibrating laboratories* [in Ukrainian].
10. DSTU-N RMG 43:2006. *Metrology. Application of guidelines on expression of measurement uncertainty* [in Russian].
11. EUROLAB Technical Report 1/2006. *Guide to the evaluation of measurement uncertainty for quantitative test results*. www.eurolab.org.
12. Watson, G. (2006) *«Six sigma» Methodology for leaders or how to reach 3, 4 defects for million of possibilities*. Ed. by A. L. Raskin, Yu. P. Adler. Appendix to journal "Standards and Quality". Moscow, RIA.

Ю. К. БОНДАРЕНКО, О. В. КОВАЛЬЧУК

ІЗС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевица, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Оценка риска эксплуатации сварных конструкций на основе мониторинга процессов системы управления качеством и проведения испытаний методами НК и ТД

Определены особенности построения системы управления качеством согласно новой редакции ISO 9001:2015 на основе разработки процессов системы с позиций риск – ориентированного подхода. Более детальному техническому регулированию и контролю подвергаются процессы системы, которые существенно влияют на качество сварных конструкций и могут содержать повышенную величину риска. В работе определены особенности риска в сварочном производстве, связанные с: эксплуатационным назначением конструкции; особенностями производства – наличием «специального» процесса сварки; персонализированными работами по технической экспертизе, сварке и неразрушающему контролю; неопределенностью результатов испытаний и аудита. Приведены международные нормативные документы, которые определяют требования к организации указанных процессов системы менеджмента и проведению неразрушающего контроля. По результатам проведенных аудитов системы управления качеством предприятий сварочного производства и полученным данным испытаний в аккредитованной испытательной лаборатории ИЭС определен характер влияния уровня управления качеством производства на качество и риск продукции. Изу-

чение и управление риском на основе методологии стандарта ISO/IEC 31000 служит для предотвращения отрицательных результатов производства, связанных с дефектностью продукции, возможными авариями, вредными влияниями, однако и выявляет скрытые возможности для его усовершенствования. Библиогр. 12, рис. 6.

Ключевые слова: риск, менеджмент риска, оценка риска, качества сварной конструкции и технологических процессов сварки, совершенствование системы управления качеством сварочного производства

EVALUATION OF RISK OF WELDING STRUCTURES SERVICE USING MONITORING OF PROCESSES OF THE QUALITY CONTROL SYSTEM AND TESTING USING NT AND TD METHODS

Yu. K. BONDARENKO, O. V. KOVALCHUK

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

The peculiarities of constructing a quality control system for welding production in accordance with the new edition of ISO 9001:2015 were determined based on the development of the system processes from the standpoint of risk, i.e. oriented

approach. To a more detailed technical regulation and control, those processes of the system are subjected, which significantly affect the quality of welded structures and may contain an increased risk. The work defines the peculiarities of risk in welding production, related to the purpose of a critical structure, to the peculiarities of production – the presence of a «special» welding process, personalized works on technical expertise, welding, non-destructive testing, uncertainty of test results and audit. The international standard documents, which determine the requirements to organization of the mentioned processes and performance of non-destructive testing, are given. According to the results of the carried out audits of the system for control of welding production and the tests data received in the accredited testing laboratory of the PWI, the nature of influence of the level of quality control on the quality and risk of products were determined. The investigations and risk control based on methodology of the standard ISO/IEC 31000 serves to prevent the negative results of production associated with defectivity of welded structures, possible accidents, harmful influences, however it also reveals the hidden possibilities for its improvement. 12 – Ref., 6 – Fig.

Keywords: risk, risk management, risk evaluation, quality of welded structure and technological welding processes, improvement of system for quality control of welding production

Надійшла до редакції
07.06.2017

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 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
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

ВІТАЄМО З ЮВІЛЕЄМ ЮРІЯ КУПРІЯНОВИЧА БОНДАРЕНКА!



26 серпня 2017 р. відсвяткував свій 70-річний ювілей Юрій Купріянович Бондаренко – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, заступник керівника ДП НТЦ «СЕПРОЗ» НАН України, член-кор. Транспортної академії України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Ю. К. Бондаренко народився в Києві. Після закінчення в 1971 р. Київського політехнічного інституту, незмінно працює в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (ІЕЗ). У 1985 р. закінчив аспірантуру в Ленінградському інституті інженерів залізничного транспорту (керівник – професор А. К. Гурвич), у 1986 р. захистив кандидатську дисертацію за фахом «Методи контролю в машинобудуванні». Займається дослідженнями, розробкою та впровадженням засобів забезпечення якості в галузях машинобудування, транспорту, нафтопроводів та хімічної промисловості. Він приймав безпосередню участь у розробці і впровадженні систем неруйнівного контролю й забезпечення якості на ряді провідних підприємств: «Мостобуд № 1» (Київ), Дрогобицький долатний завод, Харцизький трубний завод, Крюківський вагонобудівний завод, ІЦ «Титан» (Київ), НВФ «Зонд» (Івано-Франківськ), ВО «Оріана» (Калуш), Висунський і Бакинський металургійні заводи та на багатьох інших промислових підприємствах, керував роботами з підготовки до акредитації 15-ти випробувальних лабораторій ІЕЗ.

Зараз Юрій Купріянович успішно керує провідним в Україні напрямом, який здійснює роботи з технічної експертизи та організації випробувань зварних конструкцій, виробів, матеріалів, технологій, розробки систем управління якістю зварювального виробництва, а також досліджує про-

блеми та методи забезпечення якості, технічної експертизи, управління ризиками у зварювальному виробництві, технологічних процесів зварювання та технічних послуг у галузі зварювання і неруйнівного контролю.

Ю. К. Бондаренко – один із організаторів Національного атестаційного комітету України з неруйнівного контролю. Упродовж 27 років входить до складу Правління УТ НКТД, є членом Товариства зварювальників України, головою атестаційної комісії персоналу з акредитації Національного агентства акредитації України; технічних комітетів Національного органу стандартизації ТК-44, ТК-78, аудитором із системи управління якістю «TUV Rheinland», аудитором із продукції і послуг в системі «УкрСЕПРО», одним із учасників розробки і гармонізації стандартів та інших НД у галузі зварювання, контролю і забезпечення якості у зварювальному виробництві, делегатом 5-ї комісії «Контроль і забезпечення якості» Міжнародного інституту зварювання (IIW). Він пройшов навчання в Англії за програмою «TASIC», Датському інституті зварювання «FORCE», у Берліні в рамках програми «AMOS-проект», є членом редакційних рад журналів «ТД і НК» і «Сварщик», автором біля 200 статей та більше 20 авторських свідоцтв і патентів.

Він нагороджений Подякою «За заслуги» Держстандарту України, нагрудним знаком і сертифікатом Міжнародного інституту зварювання, грамотою «За особливий внесок у ліквідацію наслідків аварії на ЧАЕС» МНС України, Почесною грамотою Київського міського голови «За вагомий особистий внесок у розвиток промисловості, багаторічну сумлінну працю і високий професіоналізм», Почесною грамотою Української асоціації якості «За сприяння розвитку руху за якість і досконалість в Україні».

Прекрасні людські якості Юрія Купріяновича Бондаренка, його висока ерудиція і комунікабельність здобули йому авторитет і заслужену повагу дефектоскопічної спільноти України.

З нагоди Вашого Ювілею прийміть, вельмишановний Юрію Купріяновичу, найщиріші вітання від Ваших друзів і колег! Ви справжній професіонал в галузі НК і ТД, людина компетентна, вольова і доброзичлива. Від щирого серця бажаємо ще багато наповнених корисними справами і земними радощами років. Нехай Ваша плідна праця буде щедрою на професійні здобутки, а Ваш життєвий досвід і надалі слугує нашій з Вами спільній діяльності на почесному і відповідальному напрямку неруйнівного контролю та забезпечення якості зварних конструкцій.

*Редколегія та редакція журналу
«Технічна діагностика і неруйнівний контроль»*