

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, З. А. Майдан (отв. секр.),

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. Стрыжало

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 сверхтвердых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичов

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

М. Г. Чаусов

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

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150, ул. Боженко, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета, Т. В. Юштина

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Евгений Оскарович Патон – выдающийся ученый
в области сварки и мостостроения

(к 145-летию со дня рождения) 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

НЕКЛЮДОВ І. М., НАЗАРЧУК З. Т., СКАЛЬСЬКИЙ В. Р.,

ДОБРОВОЛЬСЬКА Л. Н. Застосування методу

акустичної емісії для діагностування корпусів ядерних

реакторів (Огляд). Повідомлення II. Метод акустичної

емісії в діагностуванні корпусів реакторів АЕС. Частина 2 7

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А. Моделирование

колебаний чувствительной пластинки применительно к

датчикам акустической эмиссии. Сообщение 1 17

ТРОИЦКИЙ В. А., МИХАЙЛОВ С. Р., ПАСТОВЕН-

СКИЙ Р. А., ШИЛО Д. С. Современные системы радиа-

ционного неразрушающего контроля 23

СТАНКЕВИЧ О. М. Застосування вейвлет-перетворення

сигналів акустичної емісії для оцінювання макроруйну-

вання конструкційних матеріалів 36

НОЗДРАЧЕВА Е. Л., СУЧКОВ Г. М., ПЕТРИЩЕВ О. Н.,

РОМАНЮК М. И. О возбуждении ультразвуковых волн в

металлах емкостным преобразователем. Часть 1 45

БУРЯК Т. Н., ТАРАНЕНКО А. А., ЯРОШЕНКО Н. В.,

БУСЬКО С. П., МАЛЫШ А. Д. Комплексная

сопоставительная оценка критериев качества сварных

особотонкостенных труб из стали TP 316L, полученных в

разных условиях 51

ГЛУХОВСКИЙ В. Ю. Застосування тепловізійного

контролю для моніторингу технічного стану промислових

димових труб 55

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ЯЦЕНКО С. Я., КОРОВЕЦ Ю. Я., ЛОЗЕНКО А. П.,

ПЕТРЕНКО В. И., ШУМЕЙКО Н. А. Рентгенотелевизи-

онные системы «Полискан» 60

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. PATON

O. I. Boichuk, E. F. Garf, E. A. Davydov,
A. T. Zelnichenko, L. M. Lobanov,
Z. A. Maidan (Executive Secretary)

A. Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),
Yu. N. Posypaiko,

V. A. Troitskii (Deputy Editor-in-Chief),

E. V. Shapovalov
 PWI of the NASU, Kiev, Ukraine

V. A. Stryzhalo
 Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine

N. P. Aleshin
 N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich
 Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich
 Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash
 Ivano-Frankovsk National Technical Institute of Oil
 and Gas, Ukraine

V. V. Kluev
 CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin
 Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine

N. V. Novikov
 Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko
 Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko
 Kharkov National University of Radioelectronics,
 Ukraine

S. F. Fomichev
 KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov
 National University of Bioresources and Nature
 Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin
 IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

Address

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

Scientific editors

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

Editors

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda, T. V. Ushtina

State Registration Certificate
 KV 4787 of 09.01.2001.
 All rights reserved.

«Tekhnicheskaya diagnostika
 i nerazrushayushchiy kontrol»
 journal is republished cover-to-cover in English
 under the title of «Technical Diagnostics
 and Non-Destructive Testing» by Cambridge
 International Science Publishing, UK.

CONTENTS

Evgenii Oskarovich Paton – outstanding scientist
 in the field of welding and bridge-building
 (to 145th anniversary of E. O. Paton)..... 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

NEKLYUDOV I. M., NAZACHUK Z. T., SKALSKII V. R.,
DOBROVOLSKAYA L. N. Application of acoustic emission
 method for diagnostics of nuclear reactor bodies (Review).
 Information II. Method of acoustic emission in diagnostics of
 NPP reactor bodies. Part 2. 7

NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A. Simulation of
 sensitive plate vibrations in the case of acoustic emission
 sensors. Information 1 17

TROITSKII V. A., MIKHAILOV S. R., PASTOVENSKII R. A.,
SHILO D. S. Modern systems of radiation non-destructive
 testing 23

STANKEVICH O. M. Application of wavelet-transformation of
 acoustic emission signals for evaluation of structural
 material macrofracture 36

NOZDRACHEVA K. L., SUCHKOV G. M., PETRISHCHEV
O. N., ROMANYUK M. I. On ultrasonic wave excitation in
 metals by capacitive transducer. Part 1 45

BURYAK T. N., TARANENKO A. A., YAROSHENKO N. V.,
BUSKO S. P., MALYSH A. D. Comprehensive comparative
 evaluation of quality criteria of superthin-wall welded pipes
 from TR316L steels made under different conditions. 51

GLUKHOVSKII V. Yu. Application of thermovision control for
 monitoring of technical condition of industrial chimneys 55

INDUSTRIAL

YATSENKO S. Ya., KOROVETS Yu. Ya., LOSENKO A. P.,
PETRENKO V. I., SHUMEIKO N. A. «Poliscan» X-ray TV systems 60

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

Евгений Оскарович Патон — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ В ОБЛАСТИ СВАРКИ И МОСТОСТРОЕНИЯ (к 145-летию со дня рождения)



Академик Е.О. Патон

Евгений Оскарович Патон вошел в историю науки и техники как ученый, инженер, организатор производства, общественный деятель, основатель научных школ мостостроения и сварки. Его труды легли в основу многих научных направлений, которые сохранили актуальность до сих пор. Его жизнь и деятельность описаны в «Воспоминаниях», в статьях и повестях соратников, сотрудников, литераторов, историков.

Деятельность, поступки, принимаемые Евгением Оскаровичем решения, высказываемые размышления часто не совпадали с существовавшими шаблонами и складывающимися обстоятельствами, вследствие чего не всегда сразу воспринимались даже коллегам.

Ему пришлось жить и работать в сложнейшие смутные периоды истории, пережить смену государственного строя и две мировые войны, подвергаться опасности и бороться за свою работу, отстаивать идеи и утверждать справедливость. Однако он всегда, не задумываясь, руководствовался такими принципами, как любовь к родине, труду, честность во всем, требовательность к себе и к ученикам, сотрудникам, внимательное отношение к людям, спокойное отношение к наградам. К счастью, его работы в области мостостроения и сварочного производства решали масштабные проблемы на пути научно-технического прогресса, вносили важный вклад в государственные программы индустриализации, производства вооружений, послевоенного восстановления экономики. Педагогическая, организационная и общественная деятельность Е.О. Патона была высоко оценена руководством страны и признана за рубежом.

Евгений Оскарович Патон родился 20 февраля (4 марта) 1870 г. в семье русского дипломата, бывшего военного инженера Оскара Петровича Патона. В 1884 г. он окончил инженерно-строительный факультет Королевской Саксонской технологической высшей школы в Дрездене. Но для того, чтобы работать в России Е.О. Патону пришлось сдавать экзамены и защищать проекты в Петербургском институте инженеров путей сообщения. В 1896 г. он получает диплом инженера, проектирует мосты, преподает в Петербурге и

Москве, в 1901 г. защищает диссертацию. В 1904 г. профессора Е.О. Патона приглашают заведовать кафедрой мостов в Киевском политехническом институте. Он успешно совмещает педагогическую и научную работу с проектированием и руководством строительством мостов. Им внесен большой вклад в создание научных основ расчета пролетных строений, мостов, технологию их строительства и методов испытания. По проектам Евгения Оскаровича было сооружено более 40 мостов оригинальных конструкций, среди которых Мухранский мост через р. Куру в Тбилиси, мосты в Киеве через р. Днепр и Петровскую аллею, путепроводы в Москве, перекрытия залов Киевского политехнического института и гостиницы «Метрополь». С началом Первой мировой войны Е.О. Патон разработал конструкцию разборных мостов, победив на международном конкурсе французского инженера Ж. Эйфеля.

В 1929 г. Е.О. Патон был избран академиком Всеукраинской академии наук (ВУАН, теперь — НАН Украины) и этот год стал началом нового этапа в его творческой деятельности.

Е.О. Патон проникся идеей применить при строительстве мостов вместо клепки сварку. Интуиция ученого и опыт инженера подсказали ему, что дальнейшее развитие мостостроения и многих других отраслей производства на основе клепки невозможно. 2 мая 1929 г. по предложению Е.О. Патона Президиум ВУАН принимает решение о создании Электросварочной лаборатории, Правительство УССР выделяет средства на ее развитие. Ученый разворачивает исследования работоспособ-



Мухранский мост через р. Куру, соединивший в 1911 г. две части Тбилиси. Е.О. Патон вместо заказанной трехпролетной конструкции выполнил мост арочным однопролетным



В 1927 г. мост им. Евгении Бош соединил Киев с рабочими поселками и всей Левобережной частью Украины. Е.О. Патону пришлось решить уникальные проблемы — повторить контуры взорванного в войну Николаевского цепного моста, нравившегося киевлянам, и «привязать» балки его же разборных мостов военного периода к сохранившимся опорам цепного моста

ности сварных конструкций, работы по созданию покрытых электродов и исследованию процесса плавления металла при сварке, разрабатывает рациональные типы сварных конструкций, оказывает помощь в проектировании и внедрении сварки на предприятиях. В 1931 г. Е.О. Патон поставил перед собой еще одну задачу — автоматизировать процесс дуговой сварки. Объем плановых научно-исследовательских и производственных заказных работ быстро расширялся.

Следует отметить, что в этот период отдельными проблемами сварочного производства занимались в лабораториях фирм и в вузах разных стран. В 1932 г. впервые в мире Е.О. Патон выдвинул идею комплексного подхода к решению проблем сварки, лежащих в металлургической, электротехнической и многих других областях знаний, и создания учреждения, в котором можно самостоятель-



В 1909 г. Е.О. Патон, участвуя в конкурсе по благоустройству Киева, предложил проложить аллею в Царском саду и установить арочный мост. В соответствии с его проектом мост строили на земле, и по мере готовности подрывали землю, конструкция опускалась и стала на подготовленные опоры. Мост стал украшением Киева

но решать все задачи, возникающие на пути развития новых технологий. Он разрабатывает структуру организации, куда входят научно-исследовательские подразделения, конструкторское бюро, мастерские, экспериментальные и внедренческие группы. В 1933 г. создание института было утверждено Президиумом ВУАН. 3 января 1934 г. первая в мире специализированная научно-исследовательско-конструкторская организация в области сварочного производства правительственным постановлением получила официальный статус — «Институт электросварки». Директором и научным руководителем института Е.О. Патон был до последних дней жизни. В 1935 г. в Киевском политехническом институте ученый организовал кафедру сварки, которой руководил до 1939 г.

В конце 1930-х годов коллектив Института электросварки создает под руководством ученого отечественный способ дуговой автоматической сварки под флюсом. Придавая большое значение новой прогрессивной технологии, руководство страны в декабре 1940 г. приняло специальное постановление о внедрении автоматической сварки под флюсом на 20 крупных предприятиях страны.

Е.О. Патон был назначен Советником правительства по машиностроению. В марте 1941 г. за разработку способа и аппаратуры



В 1947 г. для ускорения и удешевления строительства газопровода Дашава–Киев–Брянск–Москва Е.О. Патон предложил создать полевые базы, на которых отдельные трубы соединялись в плети автоматической сваркой под флюсом



Е.О. Патон с сыновьями Б.Е. Патоном и В.Е. Патоном с моделью танка Т-34

для скоростной сварки под флюсом Е.О. Патон был удостоен Государственной премии первой степени.

В начале Великой Отечественной войны по предложению директора Института электросварки был эвакуирован на Урал, в Нижний Тагил. Сюда, на территорию «Уралвагонзавода», были эвакуированы из Харькова завод и КБ — создатели Т-34 — лучшего среднего танка Второй мировой войны. Впервые в мире под руководством Е.О. Патона была решена проблема автоматической сварки броневых сталей, были разработаны технология и оборудование для сварки корпусов танков, артиллерийского вооружения, боеприпасов, был налажен массовый выпуск танков. Производительность автоматической сварки бронекорпусов была в 10 раз выше, чем ручной, полезный объем продукции с единицы производственной площади увеличился в несколько раз. В начале 1945 г. сварка под флюсом широко использовалась на 52 заводах страны. 2 марта 1943 г. Е.О. Патону, первому из украинских академиков, было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

В апреле 1944 г. институт возвратился в Киев. В первые послевоенные годы Е.О. Патон сосредотачивает усилия сотрудников на решении проблем восстановления и развития народного хозяйства страны. Под его руководством и при непосредственном участии начинается планомерное внедрение сварки под флюсом в промышленности, строительстве и на транспорте, создаются технология и аппаратура для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом, разрабатываются поточные линии.

Впервые в мире удалось решить проблему автоматической сварки под флюсом вертикальных швов. Институт вносит большой вклад в создание новых промышленных способов производства труб, судов, железнодорожных вагонов, шахтных вагонеток, строительство магистральных трубопроводов,



Монтаж крупногабаритного резервуара (1948 г.)

негабаритных резервуаров, доменных конструкций и других объектов. Применение новых технологий сборочно-сварочных работ способствовало полному восстановлению топливно-энергетического комплекса и горно-металлургической промышленности Приднепровья, Донбасса и других регионов. Изобретение в ИЭС нового вида соединений — электрошлаковой сварки — решило проблему производства конструкций из заготовок практически неограниченной толщины.

В то же время Е.О. Патон взялся за расширение научно-исследовательских работ. Институт рос, для успешной работы лабораторий создавалось и приобреталось новое современное оборудование, для работы в нем привлекались молодые высококвалифицированные специалисты. В этот период формируются ведущие научные направления в области сварки. Разрабатываются физико-металлургические и тепловые основы сварки, научные основы механизации и автоматизации сварочных процессов, создается теория прочности сварных конструкций и соединений. При участии Е.О. Патона и под его руководством издаются капитальные труды по различным аспектам сварочной науки и техники. Перу Е.О. Патона принадлежит более 300 печатных работ.



Е.О. Патон с сотрудниками



Мост им. Е.О. Патона через р. Днепр в Киеве

Занимаясь проблемами неразъемного соединения металлов, Е.О. Патон продолжал работать в области мостостроения. В 1953 г. в Киеве открыто движение по наибольшему в Европе цельносварному автодорожному мосту через Днепр, протяженностью более полутора километров, которому присвоено имя Е.О. Патона.

Евгений Оскарович не дожил менее трех месяцев до торжественного открытия этого моста — он умер 12 августа 1953 г. Американское сварочное общество признало мост выдающейся сварной конструкцией XX века. Сейчас мост эксплуатируется с нагрузкой, в 10 раз превышающей расчетную. В проекте своего последнего моста Е.О. Патон полностью использовал возможности созданных под его руководством технологий и обошелся без арочных, решетчатых или подвесных конструкций.

Политический деятель, писатель В.В. Шульгин отмечает: «Мост Патона является большим достижением в деле мостостроения. Красота его в том, что как будто бы моста совсем и нет. Как будто бы одна из улиц Киева каким-то волшебным образом перебрасывается с правого на левый берег». Автодорожный мост через р. Днепр в Киеве длиной более 1500 м впервые в мире полностью построен с применением автоматической (до 90 %) и полуавтоматической сварки.

Отличительной чертой всей деятельности Е.О. Патона было постоянное стремление всемерно укреплять связь науки с производством, широко внедрять научные достижения в народное хозяйство. Он блестяще

соединил в себе талант выдающегося ученого и инженера.

Евгений Оскарович принимал активное участие в общественной жизни страны. В 1953 г. он был избран депутатом Киевского городского совета депутатов трудящихся, а в 1946 и 1950 гг. — депутатом Верховного Совета СССР. За выдающуюся научную, педагогическую и общественную деятельность Е.О. Патон был удостоен звания Заслуженного деятеля науки и техники, награжден орденами и медалями. В 1935 г. Е.О. Патон был избран членом Президиума АН УССР, а позднее председателем Бюро Отделения технических наук. Его дважды избирали вице-президентом Академии наук УССР.

На этих постах он внес большой личный вклад в укрепление связей институтов Академии наук УССР с производством, в расширение не только фундаментальных, но и прикладных исследований, имеющих важное значение для решения актуальных проблем становления и развития народного хозяйства. Е.О. Патон был основателем и главным редактором журнала «Автоматическая сварка».

Созданный Е.О. Патоном Институт электросварки и сегодня является мощным научно-техническим комплексом, крупнейшим центром в области сварки, защитных и упрочняющих покрытий и спецэлектрометаллургии, в состав которого, кроме научных и конструкторских подразделений, входят опытные заводы, инженерные и учебные центры.

А. Н. Корниенко, д-р ист. наук



ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРПУСІВ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ (Огляд)

Повідомлення II. Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів АЕС. Частина 2

І. М. НЕКЛЮДОВ, З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Л. Н. ДОБРОВОЛЬСЬКА
 Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Перші акустико-емісійні (АЕ) вимірювальні системи виробничого зразка та встановлені кореляції між параметрами сигналів АЕ та показниками розвитку руйнування були створені у другій половині ХХ сторіччя. Саме це й стало підставою зацікавлення розробників атомних енергетичних технологій та експлуатаційників цим новим методом, який згодом стане ефективним доповненням до існуючих технологій неруйнівного контролю (НК) для виявлення та моніторингу дефектів корпусів ядерних реакторів. Оскільки до таких об'єктів поставлено винятково високі вимоги якості та цілісності, то вже в кінці 1970-х років було спрямовано значні зусилля на розвиток методу АЕ і запровадження його у виробництво. Практична реалізація засобів і методик АЕ-моніторингу та діагностування стану корпусів реакторів АЕС підтвердила високу ефективність методу, хоча на початку їх становлення були різні твердження щодо цього. Бібліогр. 40, рис. 3.

Ключові слова: акустична емісія, показники розвитку руйнування, атомні енергетичні технології, виявлення та моніторинг дефектів

Перші застосування методу АЕ. Як зазначено у попередній частині повідомлення*, у 1960–1970-х роках метод АЕ бурхливо розвивався у різних напрямках. Із поступом електроніки швидко розвивалась інструментальна база для АЕ-діагностування. Завдяки розробкам Данегана почали виробляти промислові зразки АЕ-систем. За цей час створено кілька мобільних лабораторій з багатоканальними АЕ-системами. Крім того, покращували характеристики АЕ-перетворювачів, що дозволяло підвищити якість зареєстрованих АЕ-сигналів. Використовуючи наявне обладнання, лабораторії накопичували досвід щодо характерних особливостей АЕ-даних, що реєстрували під час руйнувань матеріалів, причому спектр досліджених матеріалів був дуже широкий. Аналіз отриманих даних дозволив висунути кілька емпірико-аналітичних залежностей між параметрами сигналів АЕ та параметрами руйнування, що за характером відносяться як до крихких, так і до в'язких, чи змішаних. Залучення основ механіки руйнування та фізичного матеріалознавства дозволило створити теоретичну основу для методу АЕ.

Швидкий розвиток методу АЕ зацікавив розробників та експлуатаційників ядерного енергетичного обладнання та відповідні контролюючі органи. Виникла надія, що цей метод зможе стати принципово важливим доповненням до існуючих методів НК для контролю цілісності корпусів реакторів та відповідності їхніх механічних характеристик нормативним вимогам, що гарантують їх

безпечне експлуатування. Для цього метод АЕ повинен був пройти всі необхідні етапи для затвердження у нормативній базі, яка є юридичною основою для експлуатування АЕС.

Ще на початку 1980-х років виходить друком кілька оглядів, в яких узагальнено досвід впровадження методу АЕ на корпусних реакторних сталях [1–3]. Бентлі у своєму огляді, опублікованому у 1981 р. [1], вважав, що у другій половині 1970-х років ентузіазм щодо застосування АЕ на корпусах ядерних реакторів згас, оскільки в'язкі сталі корпусів реакторів є слабкими джерелами акустичних хвиль.

Від 1975 р., зазначено в огляді, відбулося зміщення акценту з прямого застосування методу на корпусі реактора до більш фундаментальних лабораторних вимірювань, які допомагали встановити фізичну природу АЕ. Розглядаючи практичність методу АЕ тільки для виявлення динаміки крихкого руйнування, Бентлі наголошує на можливій користі від методу на етапі виготовлення корпусу, коли здійснюють гідростатичні випробування, або ще й раніше – на етапі виконання зварних з'єднань, коли за допомогою методу АЕ можна ефективно визначити дефектність зварного шва. Джерелами АЕ в корпусі ядерного реактора є пластична деформація та повільний ріст тріщини. При цьому, на думку фахівців, на мікроструктурному рівні головними джерелами АЕ є відшарування та розтріскування неметалевих включень. З огляду на рівень чутливості, якого можна було до-

*Див. журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 2014, № 4, с. 3–11



сягнути на діючих реакторах типу PWR за допомогою наявних АЕ-систем, один зареєстрований АЕ-імпульс відповідав у середньому 300 мм³ пластично здеформованого об'єму металу. Зварні шви випромінювали ще менш сигналів через відсутність видовжених неметалевих включень. У сталі А533В, у якій знизили вміст сірки, низько-амплітудна АЕ була пов'язана з груповим рухом дислокацій, однак на відміну від лабораторних досліджень, її реєстрування на корпусах діючих реакторів ускладнювала значна дисперсія сигналу. Ріст тріщини у типовому товстостінному в'язкому матеріалі спричиняє АЕ внаслідок розширення пластичної зони навколо її вершини. Тріщина росте повільно за механізмом коалесценції мікропор. Під час руйнування корпусної сталі А533В, однак, зареєстровано незначну частину АЕ-сигналів, які, з огляду на їхні характеристики, можливо виникали від ступінчастого підростання тріщини. Радіаційне старіння та термовплив під час зварювання можуть зумовити збільшення частки таких сигналів. З іншого боку, згасання хвиль у корпусах реакторів та наявність промислового шуму зумовлює втрату більшості сигналів АЕ. За певними оцінками один імпульс АЕ, зареєстрований на діючому реакторі, відповідав би підростанню площі тріщини на 2 мм² [1].

Огляд Бентлі містить також інформацію про випробування методу АЕ на модельних реакторах, у стінках яких було наведено дефекти відповідного розміру. У більшості випадків такі дослідження були перевіркою правильності підходів механіки руйнування, а застосування при цьому АЕ-контролю виконувало допоміжну функцію. Відібравши чотири випадки, коли АЕ-дослідження були проведені на належному рівні, Бентлі підсумовує отримані результати. Наприклад, під час гідростатичного випробування корпусу експериментального реактора EBOR діаметром 3,4 м і товщиною стінки 150 мм не виявлено АЕ-сигналів, які б переконливо свідчили про розвиток руйнування. Гідростатичні випробування до руйнування ємності діаметром 1,5 м в лабораторії UKAEA Culcheth, під час яких три групи науковців використовували одночасно три різні АЕ-системи, дали суперечливі результати. Одна з груп успішно передбачила час до руйнування, але не зуміла здійснити локації джерела АЕ. Інша група була успішніша у локації джерел. Третя – не зуміла показати, що отримані АЕ-дані мають якесь відношення до розвитку руйнування. Під час випробувань вченими Berkeley Nuclear Laboratories дослідної ємності CEGB аж до її руйнування було зареєстровано АЕ-сигнали від розвитку пластичної зони. Однак перевищення амплітудами цих сигналів рівня шумів було незначне. Врешті, АЕ-контроль під час гідростатичних випробу-

вань кількох ємностей, які випробовували в рамках програми товстостінних сталевих технологій (Heavy Section Steel Technology – HSST), не дав достовірних результатів для етапу субкритичного розвитку руйнування, за винятком одного досліду на ємності V-5, коли вдалося зареєструвати підвищення рівня акустичної активності перед початком закритичного розвитку тріщини [1].

Далі у своєму огляді Бентлі приділяє увагу механізмам генерування та поширення пружних хвиль під час руйнування металу; обладнанню (перетворювачам АЕ, хвилеводам, системам обробки та реєстрування сигналів) та АЕ-діагностуванню корпусів ядерних реакторів. Узагальнивши наявний матеріал застосування методу для діагностування корпусів ядерних реакторів, дослідник ділить цей досвід на такі категорії [1]:

- виявлення дефектів виробництва під час гідростатичних випробувань перед введенням ємності в експлуатацію;
- виявлення дефектів під час гідростатичних випробувань діючих реакторів та АЕ-моніторинг дефектів, які розвиваються;
- АЕ-моніторинг витоків теплоносія;
- АЕ-моніторинг процесу зварювання.

АЕ-моніторинг проводили також під час роботи ядерних реакторів для встановлення рівня і характеристик акустичних шумів. На реакторі San Onofre потужністю 430 МВт виробництва Westinghouse під час його роботи на повну потужність акустичні шуми, заміряні групою Гаттона на корпусі реактора, приходили переважно від охолоджувальних помп. Спектр шуму згасав досить швидко зі зростанням частоти від 100 до 3000 кГц. Рівень шумів на частотах 1100 кГц і вище можна вважати достатньо низьким для задовільного проведення АЕ-моніторингу. З огляду на значне згасання сигналу на високих частотах, АЕ-перетворювачі повинні бути розташовані поблизу небезпечного дефекту. Для нижчих частот рівень шуму є занадто високий, щоб виявити підростання тріщини. Це пояснює, чому на реакторі EBOR, на корпусі якого були встановлені АЕ-перетворювачі з частотою 200 кГц, не вдалося зареєструвати достовірних сигналів АЕ під час розвитку руйнування. Подібні вимірювання здійснювали на промислових реакторах Prairie Island потужністю 530 МВт (як під час введення в експлуатацію, так і при його роботі на повну потужність) та Indian Point [1].

Обговорюючи наведені результати, Бентлі вважає, що з огляду на амплітудно-частотні характеристики шумів, метод АЕ може бути ефективним тільки для моніторингу дефектів, розташованих у корпусі реактора відоме. Якщо б радіаційне окрихчування спричинило зміну механізму розвитку руйнування та збільшення амплітуди



АЕ-сигналів, то можливо, що АЕ-контроль можна було здійснювати для всього корпусу перетворювачами з нижчими робочими частотами. Серед чотирьох зазначених вище напрямів, де на думку автора можливе застосування АЕ-контролю, перші два на початку 1980-х років були неефективними, а от моніторинг витікання теплоносія та моніторинг зварювання виглядали більш перспективними [1].

Наступний огляд, який з'явився через два роки, опублікували Скрабі і Ведлі [2]. Описуючи позитивні і негативні аспекти застосування методу АЕ для різних етапів виготовлення та експлуатації корпусів ядерних реакторів, вони вказували на шляхи покращення точності локації та кількісної оцінки джерел акустичної емісії, враховуючи чутливість методу не тільки до росту тріщини, але і до пластичної деформації. Підтверджуючи висновки Бентлі [1], автори наголошують на перспективності застосування методу АЕ для моніторингу зварювання. Вони також зазначають, що метод може бути дуже корисним під час гідростатичних випробувань за обставин, коли матеріал частково втратив свою пластичність. Якщо ж матеріал зберігає високу в'язкість руйнування, то АЕ сигнали, які генеруються під час поширення в'язкої тріщини, можуть виявитися заслабкими для їх надійного виявлення. Високий рівень шумів і значна дисперсія інтенсивності сигналів, що виникають внаслідок підростання дефектів у експлуатаційних умовах, не дозволяють впроваджувати АЕ-моніторинг на цьому етапі розвитку. Тим не менш використання АЕ-методу для відстежування можливих наскрізних дефектів, що ведуть до витоку теплоносія, і далі виглядає дуже перспективно. Подальші дослідження потрібні, щоб з'ясувати наскільки ефективним є метод АЕ для відстежування дефектів, які виникають чи розвиваються внаслідок термошоку під час аварійного охолодження реактора.

У 1985 р. з'являється великий огляд Рунова, в якому на основі теоретико-експериментальних досягнень узагальнено багаторічний досвід використання методу АЕ для контролю цілісності конструкцій та обладнання (головним чином першого контуру) атомних електростанцій [3]. Відзначено, що метод АЕ має перевагу над іншими методами контролю у частині локації дефектів і зберігає певний потенціал для ефективного виявлення дефектів та місць витікання як перед введенням реактора в експлуатацію, так і під час періодичних гідростатичних тестів для підтвердження цілісності корпусу реактора. Саме локація тріщин під час гідростатичних тестів, на думку автора, є тим завданням, яке метод АЕ може вирішувати досить ефективно, хоч щодо результатів кількісної оцінки розмірів тріщини, то вони незадовільні. Набагато краще виглядає справа з кількісною оцінкою

наскрізних дефектів, через які витікає теплоносія, хоч і над цим застосуванням методу АЕ ще слід немало попрацювати.

У 1980–1990-х роках з'являються численні праці групи Гаттона про дослідження АЕ-моніторингу всього обладнання першого контуру включно з корпусом ядерного реактора та головних циркуляційних трубопроводів [4–31]. Ці дослідження, які проводились у Pacific Northwest Laboratory – PNL, фінансував Комітет із регулювання ядерної енергії США (U.S. Nuclear Regulatory Commission). Вони були спрямовані на впровадження методу АЕ для моніторингу цілісності корпусів ядерних реакторів. Це була єдина на той час програма, завдяки якій зазнав значного розвитку як інструментарій метод АЕ, так і його теоретичні та прикладні аспекти, включаючи значні масиви АЕ-даних, отриманих на лабораторних зразках і на реальних об'єктах контролю. Перший етап цієї програми полягав у проведенні лабораторних вимірювань на зразках, виготовлених з корпусної реакторної сталі, та встановленні кореляцій між розвитком руйнування та параметрами зареєстрованих сигналів АЕ. Другий етап полягав у АЕ-випробуваннях товстостінної модельної ємності ZB-1, яку піддавали тривалим втомним навантаженням. На третьому етапі АЕ-моніторинг проводили на діючому реакторі Watts Bar Unit 1 як під час гідростатичних передексплуатаційних випробувань, так і під час пуску реактора та його роботи. Задля кількісної оцінки параметрів АЕ-сигналів та ефективної локації джерел АЕ здійснювали окрему процедуру калібрування каналів АЕ-системи із використанням АЕ-імітаторів [26].

Впродовж цих років ідея впровадження методу АЕ для моніторингу цілісності корпусів реакторів зазнала як переоцінки, так і критики. Критика, однак, відіграла і позитивну роль, оскільки вказувала на недоробки та на проблемні місця, над якими слід було працювати. Це, загалом, сприяло розвитку самого методу АЕ.

Для відпрацювання методики було виготовлено спеціальний стенд зі зварною ємністю під тиском, на якій вивчали параметри сигналів АЕ, що виникають внаслідок поширення тріщин від механічних надрізів та від дефектів у зварному з'єднанні. Згодом цю методику було застосовано на діючому ядерному реакторі у США. Було показано, що АЕ-систему можна налаштувати так, щоб вона розрізняла сигнали від розвитку тріщини, відлаштовуючись від акустичних шумів, які виникають від перегрітого через реактор теплоносія.

Промислове застосування АЕ для діагностики стану корпусів реакторів АЕС. У 1984 р. Гаттон доповідав про можливість застосування АЕ-контролю за підростанням дефектів у єм-



ностях високого тиску ядерних реакторів (як під час гідростатичних випробувань, так і в робочих режимах) [10]. Роботи проводили у таких трьох напрямках:

- розроблення методів ідентифікації підростання тріщин за сигналами АЕ;
- встановлення співвідношень між зареєстрованою АЕ і підростанням тріщини;
- визначення можливостей контролю ємностей високого тиску під час гідростатичних випробувань і у робочих режимах.

Під час підготовки до гідростатичних випробувань у центральній частині ємності розмірами $120 \times 700 \times 1500$ мм штучно створювали три втомні тріщини (рис. 1): дві на внутрішній поверхні (криві 1, 2) і одна – на зовнішній (крива 3). Розміри всіх трьох дефектів були різними. Це дозволило одержати для кожного дефекту різні швидкості росту у подальших випробуваннях.

Під час проведення гідростатичних випробувань вода мала температуру 65 і 265 °С. Для реєстрації сигналів АЕ використовували АЕ-перетворювачі трьох типів: з металевими хвилеводами, які закручували у спеціально просвердлені отвори на поверхні ємності; з металевими хвилеводами, які щільно притискали до досліджуваної поверхні; низькочастотні АЕ-перетворювачі, що безпосередньо встановлювали на поверхні ємності (їх використовували тільки у випадку гідростатичних випробувань).

Апаратура АЕ-контролю складалася з блоку реєстрації, де прийняті АЕ-сигнали опрацьовували – визначали їх часові залежності, амплітуду, різницю часу приходу та інші характеристики. Отриману інформацію переводили у цифровий код, записували на магнітну стрічку і паралельно подавали у процесор, де визначалося місце розташування дефекту, встановлювалося чи зв'язаний даний сигнал АЕ з підростанням тріщини. На підставі накопиченої інформації виробляли оцінку ступеня небезпеки дефекту.

За результатами проведених випробувань були одержані залежності глибини тріщини від числа циклів навантаження при 65 °С (рис. 1). Глибину тріщини оцінювали за величиною розкриття її вершини. У зв'язку з дією води на внутрішні дефекти останні, як виявилось, росли дещо швидше, ніж зовнішні.

З аналізу сигналів АЕ, одержаних з досліджуваної частини ємності, було встановлено, що емісія тут має певні закономірності. У всіх випробуваннях, проведених при 65 °С, сигнали мали великі амплітудні значення, які відповідали максимальним значенням навантаження в циклі. Більше 60 % сигналів мали значення амплітуди вище 9 В. На відміну від цього, за лабораторних випробувань зразків тільки $8,5$ % сигналів АЕ мали ана-

логічні значення амплітуд. Крім того, виявилось, що сигнали щільно групуються біля максимального навантаження в циклі. Під час проведення лабораторних досліджень тільки близько 2 % зареєстрованих сигналів відповідало максимальному навантаженню в циклі. Більшість подій АЕ була притаманна середній величині навантаження. Інформацію про величину навантаження під час випробувань вводили в систему АЕ-контролю і запам'ятовували. З цією метою цикл навантаження умовно ділили на 100 частин. Кожному значенню навантаження відповідав номер відповідної частини, який запам'ятовувала система.

На підставі інформації про місцеположення дефекту були отримані значення швидкості рахунку сигналів АЕ залежно від часу. Разом із результатами лабораторних випробувань, що дозволили встановити швидкість рахунку сигналів, коли зростання дефектів відсутнє, отримали можливість оцінити швидкість росту дефектів. Виявилось, що швидкість росту тріщини, встановлена за даними АЕ, є дещо вищою від встановленої за вимірюваннями розкриття її вершини.

Окрім сигналів АЕ, обумовлених підростанням штучно створених дефектів, за циклічних випробувань зареєстрували АЕ від природних втомних тріщин. Ці джерела зосереджені біля області зварних швів. Подальша перевірка швів методами НК підтвердила наявність у них тріщин. Необхідно зазначити, що сигнали від тріщин реєстрували і на відстанях 3 м до найбільш віддалених АЕ-перетворювачів. У цих випробуваннях АЕ-перетворювачі щільно притискали до поверхні. Так само вони були встановлені і у випадку АЕ-контролю реактора.

Окремою задачею АЕ-досліджень під час проведення гідростатичних випробувань було оцінювання можливості локації втомних тріщин за випромінюваними ними сигналами. Проте, за періодичних навантажень, які в $1,1$ рази перевер-

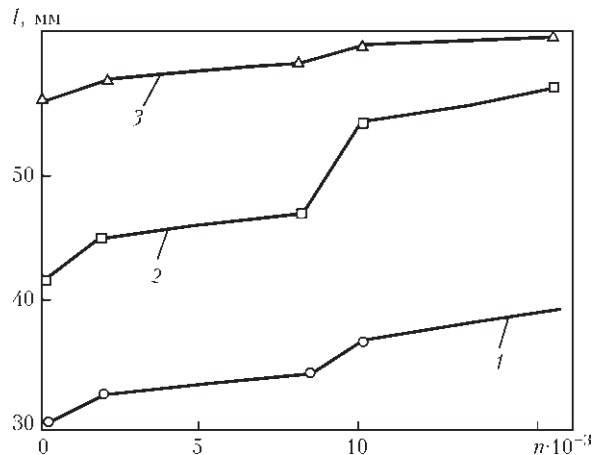


Рис. 1. Залежність глибини тріщини l від числа циклів n навантаження за температури 65 °С (позначення відповідають нумерації тріщин) [10]



шували максимальні навантаження у циклічних випробуваннях, суттєвої АЕ зареєструвати не вдалося. Ці результати змусили засумніватися в ефективності застосування АЕ-контролю з метою виявлення дефектів за гідростатичних випробувань. Зазначимо, що активність АЕ була значно вищою у випадку, коли ємність заздалегідь циклічно не навантажували до вказаних вище величин.

Однією з найважливіших проблем під час проектування систем АЕ-контролю ядерних реакторів є розроблення методу розділення сигналів, які генерує рстуча тріщина та сигналів від джерел, які не становлять небезпеки. З цією метою здійснювали чисельну обробку сигналів, яка дозволяє виділити їх істотні особливості, пов'язані зі спектральним складом (наприклад, особливості енергетичного спектру окремого сигналу, автокореляційної функції або статистичних моментів енергетичного спектру). Виділення таких особливостей дозволило зменшити кількість інформації, необхідної для опису характеристик аналізованого сигналу. На підставі встановлених особливостей імпульсів АЕ одержали правила, що дозволяють класифікувати зареєстровані сигнали.

Спочатку виділена сукупність особливостей імпульсів АЕ під час випробувань ємностей високого тиску реактора не дала задовільних результатів. Тому була складена нова група ознак сигналу АЕ, яка включала параметри авторегресійної моделі десятого порядку, що описує кожен окремий імпульс. Ця група ознак має ту перевагу, що вона не дуже чутлива до амплітуд сигналів. Ефективність її використання була продемонстрована на класифікації сейсмічних сигналів, а також в опрацюванні даних АЕ, одержаних на алюмінієвих зразках. Стосовно випробувань ємностей високого тиску реакторів, то коректність такого способу класифікації становила 75...80 %. Автори праці [10] вважають, що не дивлячись на зроблені вдосконалення, ці результати не можуть вважатися прийнятними. Статистичний аналіз показав, що коректний рівень точності у класифікації дефектів повинен забезпечувати величину похибки, яка не перевищує 10 %. Тільки в цьому випадку можливе ефективне застосування системи АЕ-контролю.

Під час проведення випробувань енергоблоку реактора система АЕ-контролю мала 16 АЕ-перетворювачів із високотемпературними хвилеводами, які притискали до поверхні корпусу реактора як у області його дна, так і біля вхідних і вихідних сопел системи циркуляції охолоджувача. Резонансні частоти перетворювачів вибирали в інтервалі 450...500 кГц. Випробування проводили за постійного підвищення температури і тиску аж до їх робочих значень 292 °С і 15,4 МПа з подальшою витримкою. У результаті експериментів встановлено, що величина шумів, що реєструють-

ся, зумовлена течією охолоджувача і залежить від умов роботи (значень температури і тиску), типу реактора, а також від типу перетворювача і конструкції хвилеводу (рис. 2).

Наведені на рис. 2 значення амплітуд сигналів від утомного підростання тріщин отримали під час попередніх випробувань ємностей високого тиску. Як видно, за температури 65 °С і тиску 2,6 МПа виділити сигнали АЕ, що генеруються втомними підростаючими тріщинами на фоні завод, навряд чи можливо навіть із використанням перетворювачів АЕ з резонансною частотою 500 кГц. За вищих температур і тиску охолоджувача умови реєстрації АЕ від тріщини значно поліпшуються. Так, за температури 177 °С і тиску 2,8 МПа, а також за вищих значень цих параметрів АЕ-перетворювачі з хвилеводами, що мають резонансну частоту 500 кГц, дозволяють досить ефективно реєструвати сигнали АЕ на фоні шумів. Окрім цього, із залежності сумарного рахунку N сигналів АЕ від рівня прикладених напружень p під час ступінчастого навантаження труби (рис. 3) видно, що під час використання високотемпера-

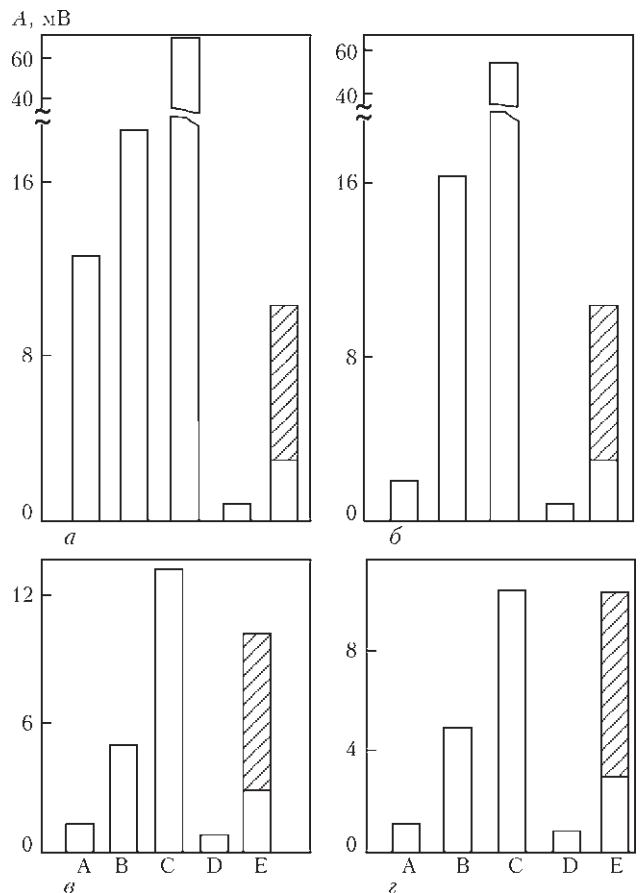


Рис. 2. Залежність рівня завод A охолоджувача від температури та тиску: А, В – зареєстрованих АЕ-перетворювачами з хвилеводом резонансної частоти 500 та 375 кГц відповідно; С – зареєстрованих високотемпературним АЕ-перетворювачем без хвилевода; D – рівень електричних завод; E – рівень сигналів АЕ за температури та тиску, відповідно: а – 65 °С, 2,8 МПа; б – 177 °С, 2,8 МПа; в – 292 °С, 8,4 МПа; з – 292 °С, 15,4 МПа [10]

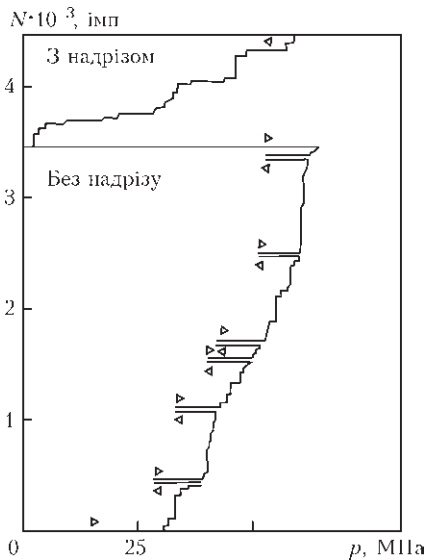


Рис. 3. Залежність сумарного рахунку N сигналів АЕ від рівня прикладених напружень p під час ступінчастого навантаження труби без надрізу та з ним [10]

турного перетворювача без хвилевода амплітуди сигналів незначно відрізняються від рівня завад і тому його застосування недоцільне. Застосовуючи ж низькотемпературні перетворювачі, можливе підвищення їх ефективності за допомогою хвилевода і зменшення чутливості до низькочастотних коливань.

З метою перевірки можливостей системи АЕ-контролю реєструвати АЕ-сигнали в робочих умовах провели серію експериментів. Компактний зразок, виготовлений з інструментальної сталі, задалегідь механічно навантажували. Після цього його встановлювали на трубу впускної магістралі, міцно прикріпивши до останньої. Далі до поверхні зразка притискали нагрітий латунний стрижень. За рахунок різниці температурних коефіцієнтів розширення відбувалося додаткове навантаження зразка, достатнє для його руйнування. Сигнали АЕ, які генерував зразок, що руйнувався таким чином, реєстрували системою АЕ-контролю за різних значень робочої температури, тиску і умов протікання охолоджувача.

За результатами проведених випробувань встановили:

АЕ-контроль дозволяє виявляти зростання як штучно створених, так і природних втомних тріщин у товстостінних ємностях високого тиску, які використовуються у ядерних реакторах;

– існує можливість детектування сигналів АЕ за наявності технологічних шумів реактора;

– дані АЕ можна використовувати для оцінювання швидкості росту втомної тріщини у товстостінній ємності високого тиску;

– застосування високотемпературних перетворювачів АЕ з хвилеводами за умов експлуатації реактора є ефективним;

– АЕ-система дозволяє достатньо надійно і безперервно вести контроль за станом працюючого реактора впродовж тривалого періоду часу (мінімум один рік);

– застосування системи АЕ-контролю дозволяє виявляти дефекти, розташовані у важкодоступних ділянках реактора.

Не менш важливими з погляду застосування методу АЕ для моніторингу цілісності корпусів ядерних реакторів є й інші праці Гаттона. До переліку завдань, поставлених для досліджень, належить розпізнавання сигналів АЕ, які є характерними тільки для росту тріщини та встановлення кореляцій між параметрами сигналів АЕ та розвитком руйнування [15–27].

Починаючи з лабораторних досліджень зразків, виготовлених із реакторної сталі A533B Class 1, дослідження продовжили на дослідній ємності ZB-1 з товщиною стінки 120 мм, а згодом і на першому реакторі АЕС Watts Bar. Вони показали, що АЕ-моніторинг корпусу діючого реактора можна успішно здійснювати не менше року за умов відлаштування від існуючих акустичних завад. Для цього добре себе зарекомендували високотемпературні АЕ-перетворювачі. Навіть в області найвищого радіаційного опромінення АЕ-моніторинг цілісності корпусу реактора виглядав перспективно. У кінці 1980-х років накопичені результати АЕ-досліджень дозволяють перейти до активного впровадження АЕ-методу у ядерну енергетику [25]. Без такого впровадження отримані результати АЕ-досліджень залишаються цікавою технічною інформацією.

У 1993 р. опубліковано звіт групи Гаттона про впровадження АЕ-системи контролю на першому енергоблоці АЕС Limerick у Філадельфії [31]. Ця праця виконувалась впродовж 1989–1993 рр., маючи на меті продемонструвати, що за допомогою АЕ-моніторингу можна ефективно реєструвати зародження тріщини та відстежувати її ріст на обладнанні першого контуру під час роботи реактора. У 1989 р. під час чергового ультразвукового обстеження обладнання першого контуру виявили тріщиноподібний дефект у зварному з'єднанні головного циркуляційного трубопроводу реактора. Його було класифіковано як міжзеренну корозійну тріщину, яка мала приблизно 18 см довжини і 10 мм глибини. Розрахувавши тріщинозміцність трубопроводу, енергогенеруюча компанія вирішила встановити контрольний зразок для відстежування динаміки розвитку тріщини, а також використати систему АЕ-моніторингу для реєстрування актів підростання тріщини під час роботи реактора. Оскільки АЕ-моніторинг на цей час торував свій шлях до нормативної бази, було укладено контракт про впровадження такого моніторингу із використанням АЕ-системи, розро-



бленої у національній лабораторії PNL (згодом – PNNL) під патронатом USNRC, тобто державної наглядової Ради з ядерних досліджень.

У рамках цього контракту передбачали продемонструвати працездатність та ефективність АЕ-моніторингу на обладнанні першого контуру реактора, використовуючи попередні напрацювання PNL, серед яких [31]:

- встановлення в лабораторних умовах кореляційних залежностей між характеристиками сигналів АЕ та параметрами ростучої тріщини, використовуючи стандартні зразки на тріщиностійкість;

- відпрацювання в лабораторії методики АЕ-моніторингу на товстостінних трубах і ємностях як за статичних, так і за втомних навантажень аж до розриву в умовах, наближених до експлуатаційних;

Для моніторингу тріщини використали первинні перетворювачі з хвилеводами і попередніми підсилювачами та восьмиканальну АЕ-систему. Підготовку і встановлення системи здійснювали згідно із затвердженою у Кодексі ASME нормою Case N-471 “Acoustic emission for successive inspection” [32]. На першому етапі були виготовлені спеціальні модулі первинних перетворювачів, кожен з яких виглядав як блок розміром 64×38×32 мм. В середині перетворювача містився п’єзокристал, вихід якого під’єднаний до індуктивної обмотки для регулювання спектральних характеристик та до попереднього підсилювача з коефіцієнтом підсилення 20 дБ. Його вихід з’єднано з BNC-конектором на корпусі блоку. Поверхня п’єзокристала через ізоляційний диск з оксиду алюмінію випиралася у кінець хвилевода, який на кілька міліметрів заходив всередину блоку. Для акустичного з’єднання контактуючих поверхонь використали клей Hysol EA934. Хвилеводи довжиною 2,7 м і діаметром 8,2 мм, а також корпуси блоків виготовили із корозійностійкої сталі типу 304. Приєднання цих модулів до АЕ-системи здійснювали за допомогою коаксіальних кабелів [31].

Калібрування чутливості первинних перетворювачів проводили у лабораторіях PNL на сталевій плиті розміром 102×305×305 мм. Для визначення спектральних характеристик первинних перетворювачів на поверхні плити створювали широкосмуговий акустичний шум від обдування її поверхні струменем гелію під тиском. Виявилося, що всі первинні перетворювачі демонстрували найвищу чутливість на частотах 400...425 кГц. При цьому рівень сигналу був задовільний, незважаючи на майже триметрову довжину хвилеводів [31].

Функціональність АЕ-системи перевіряли за допомогою АЕ-симулятора AES-1, що генерував спеціальні сигнали відповідної амплітуди, тривалості та затримки для налаштування системи

локації джерел АЕ. Відтак система реєстрування АЕ-сигналів пройшла перевірку відповідно до нормативу Кодексу ASME, згідно з яким хвилевід первинного перетворювача був зафіксований на калібрувальній плиті, після чого реєстрували по 10 разів сигнали, збуджені одним із наступних трьох способів [31]:

- ламанням грифеля олівця 0,3 мм твердості 2Н відповідно до стандарту ASTM E976;

- ударом сталеві кульки, вкиненої з певної висоти на поверхню блоку;

- збудженням пружних хвиль за допомогою п’єзокерамічного імітатора, розташованого на верхній плиті і під’єданого до генератора сигналів. Кожний імпульс повинен містити не менше, ніж п’ять періодів коливань.

За вимогами статті N-471 Кодексу ASME АЕ-система повинна розрізняти сигнали, отримані від росту тріщиноподібного дефекту (ламання грифеля олівця), від інших сигналів, що не пов’язані з ростом тріщини (кулька та імітатор), причому достовірність виявлення повинна бути щонайменше 8 із 10. Встановлено, що АЕ-система у всіх 10 випадках ламання грифеля олівця ідентифікувала сигнали як такі, що виникли від росту тріщини. Щодо падаючої кульки, то система ідентифікувала 6 із 10-ти сигналів, як таких, що не зумовлені внаслідок тріщиноутворення. А щодо імітатора, то всі 10 сигналів були категоризовані вірно [31].

Наступним етапом було встановлення первинних перетворювачів із хвилеводами на об’єкт контролю приєднанням кабелів через герметичну оболонку реактора. Після встановлення АЕ-системи необхідно було провести два кваліфікаційні кроки. Один повинен був довести працездатність на предмет виявлення та локації сигналів АЕ, інший – перевірити чи достатньо чутливі первинні перетворювачі із хвилеводами. Працездатність системи випробовували за допомогою ламання грифелів 0,5 мм на поверхні трубопроводу. Ці випробування пройшли успішно і після певних заходів, що були спрямовані на подолання проблеми шумів (наприклад, підсилення попередніх підсилювачів було підвищено до 40 дБ), АЕ-систему остаточно верифікували. Наприкінці 1989 р. система АЕ-моніторингу тріщини у циркуляційному трубопроводі першого контуру на АЕС Limerick була включена. Щомісяця оператори АЕС замінювали магнетний носій, наповнений АЕ-даними моніторингу, і відправляли його для аналізу до PNL. Після проведеного аналізу звіт про локацію джерел АЕ, кількість сигналів від кожного активного джерела та класифікацію джерел АЕ надсилали до енергогенеруючої компанії [31].

АЕ-система, що відпрацювала у безперервному режимі впродовж 16,5 місяців, показала свою



працездатність, а АЕ-метод продемонстрував перспективність для онлайн-моніторингу дефектів обладнання першого контуру реакторів АЕС. Виявилось, що шуми теплоносія не становлять серйозних проблем, як вважали на початку, оскільки АЕС Limerick обладнана реакторами типу BWR. Найбільшою проблемою виявився занадто високий рівень електричних наведених шумів, зумовлений якістю кабелів, що проходять через герметичну оболонку реактора [31].

Цікавими є особливості аналізу АЕ-даних, зареєстрованих системою АЕ-моніторингу. До результатів, які записувались на магнетній стрічці, належали рахунок імпульсів, диференційні часи приходу до кожного із первинних перетворювачів, послідовність прибування хвилі АЕ до перетворювачів, час наростання амплітуди, пікові значення амплітуд огинаючих та реальний час події. Для локації джерел АЕ обстежувана поверхня була умовно поділена на 36 однакових сегментів. Аналіз першого масиву АЕ-даних, проведений для встановлення кореляцій між параметрами сигналів АЕ та параметрами росту тріщини, виявив значну кількість неінформативних сигналів, не пов'язаних із ростом тріщини. Для їх відсіювання створено спеціальний фільтр. Як наслідок, переважна більшість неінформативних сигналів зникла, хоч була втрачена при цьому зовсім незначна частина інформативних сигналів від підростаючих тріщин [31].

Аналізуючи АЕ дані лабораторного моніторингу росту тріщини у корпусній реакторній сталі SA-533B та результати ультразвукового контролю, отримали апроксимаційну залежність:

$$da/dt = 10^3 (dN/dt)^{0,53}, \quad (1)$$

де da/dt виражена у мікродоймах за секунду, а швидкість рахунку у кількості імпульсів за секунду на градус. Така одиниця вимірювання швидкості рахунку була вибрана замість імпульс за секунду задля нормалізації рахунку імпульсів на 36-ти десятиградусних сегментах. Це відповідає залежності

$$da/dt = 2,62 (dN/dt)^{0,53}, \quad (2)$$

якщо da/dt виражена у мкм/с.

Використовуючи залежність (2), розрахували максимальне підростання тріщини за отриманими АЕ даними моніторингу циркуляційного трубопроводу. Воно становило приблизно 9 мм впродовж 15 місяців. Із аналізу результатів ультразвукового діагностування отримали ~ 12 мм росту тріщини, тобто досить добру кореляцію. Необхідно підкреслити, що чутливість методу АЕ є набагато вищою, ніж методу ультразвукового діагностування, хоч отримані розрахункові значення за даними АЕ були заниженими приблизно на 30 %, правдоподібно через кореляційну залеж-

ність (1). В той же час підростання тріщини на 2,5 мм в трубопроводі відображалось реєструванням 3–5 імпульсів системою АЕ, що можна вважати граничною чутливістю використаного обладнання. Для ультразвукового діагностування таким порогом вважали 20 % від товщини стінки, тобто понад 6 мм [31].

Крім зазначених вище, слід згадати й інші праці, в яких за допомогою лабораторних АЕ-досліджень вивчали механізми утворення пружних хвиль АЕ під час руйнування корпусних реакторних сталей. Зокрема, Огіра й Пао досліджували процес зародження мікротріщини у компактних зразках товщиною 25 мм, виготовлених із корпусної реакторної сталі A533B, під час випробувань на тріщиностійкість [33, 34]. Для цього використовували восьмиканальну АЕ-систему з широкосмуговими перетворювачами, які мали верхню частотну межу 3000 кГц та попередніми підсилювачами зі смугою пропускання 10...2000 кГц і підсиленням 60 дБ. Оцифрування сигналів здійснювали за допомогою десятирозрядного аналого-цифрового перетворювача на частоті 30 МГц. Дослідження масивів даних дозволило виділити два характерні типи сигналів АЕ, які на думку дослідників мали б відповідати різним механізмам утворення пружних хвиль. Розглядаючи три можливі механізми генерування АЕ-сигналів – рух дислокацій; утворення мікротріщин через відшарування неметалевих включень (наприклад, MnS) та ріст тріщини за механізмом коалесценції мікропор – і аналізуючи характер акустограм, дослідники дійшли висновку, що перший тип зареєстрованих сигналів зі стрімким імпульсом шириною $\sim 0,2$ мкс відображає поздовжні хвилі, які генеруються під час відшарування MnS включень. Другий тип із повільнішим (~ 1 мкс) наростанням амплітуди, найправдоподібніше, відноситься до коалесценції мікропор – домінуючого механізму в'язкого руйнування.

Не менш цікавими є АЕ-дослідження німецьких учених, що проводились у рамках програми безпеки ядерних реакторів HDR на корпусі зупиненого ядерного реактора біля Франкфурта за умов термошоку, циклічного навантаження та гідростатичних випробувань [35–40]. Аналізуючи масиви АЕ-даних, отриманих за допомогою промислової АЕ-системи DART виробництва Dunegan/Endevco Co. та шестиканальної системи обробки АЕ-даних IzfP, учені зуміли виокремити сигнали, які генерувались під час тертя берегів тріщин, від сигналів, утворених під час їх підростання. При цьому границя чутливості виявлення розвитку тріщини за допомогою АЕ-методу становила 1...5 мм² [38]. У іншій праці наголошено, що справжні параметри розвитку тріщини за термошоку не можна отримати під час лабо-



раторних випробувань зразків, а лише внаслідок натурних випробувань на ємностях, ідентичних чи наближених до реальних [39]. Метод АЕ, на думку авторів, є перспективним, якщо отримані дані проходять відповідну математичну обробку із залученням апарату механіки руйнування.

1. *Bently P. G.* A review of acoustic emission for pressurised water reactor applications // *NDT Intern.* – 1981. – **14**. – P. 329–335.
2. *Scrubby C. B., Wadley H.N.G.* An assessment of acoustic emission for nuclear pressure vessel monitoring // *Progress in Nuclear Energy.* – 1983. – **11**. – P. 275–297.
3. *Runow P.* The use of acoustic emission methods as aids to the structural integrity assessment of nuclear power plants // *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping.* – 1985. – **21**. – P. 157–207.
4. *Acoustic emission monitoring of ASME section III hydrostatic test, Watts Bar Unit 1 nuclear reactor / P.H. Hutton, T.T. Taylor, J.F. Dawson et al. / Research Report NUREG/CR-2880, PNL-4307.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1982. – 52 p.
5. *Observation and identification of crack growth modes in reactor steels using acoustic emission / R.H. Jones, P.H. Hutton, M.A. Friesel, S.M. Wolf // Workshop Proceedings.* – PNL-SA-12656. – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1984. – 136 p.
6. *Acoustic emission monitoring of hot functional testing: Watts Bar Unit 1 nuclear reactor / P.H. Hutton, J.F. Dawson, M.A. Friesel et al. / Research Report NUREG/CR-3693, PNL-5022.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1984. – 52 p.
7. *Hutton P. H., Kurtz R. J., Pappas R. A.* AE/Flaw characterization for nuclear pressure vessels // *Proc. of the 10th annual Conference Review of progress in quantitative nondestructive evaluation; Santa Cruz, 7–12 Aug. 1983.* – New York, 1984. – 3B. – P. 735–743.
8. *Summary of detection, location, and characterization capabilities of AE for continuous monitoring of cracks in reactors / P.H. Hutton, R.J. Kurtz, M. A. Friesel et al. / Research Report PNL-SA-12548.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1984. – 20 p.
9. *Hutton P. H., Pappas R. A., Friesel M. A.* Acoustic emission monitoring of preservice testing at Watts Bar Unit 1 nuclear reactor // *Research report PNL-SA-12567.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1984. – 8 p.
10. *Hutton P. H., Kurtz R. J.* Acoustic emission for on-line reactor monitoring. Results from field tests // *Proc. of the 11th Annual conf. on Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, San Diego, CA, 8–13 July, 1984.* – New York, 1985. – P. 701–708.
11. *Hutton P. H., Kurtz R. J.* Current capabilities for continuous AE monitoring to detect flaws in reactor pressure boundaries // *Research Report PNL-SA-13035.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1985. – 17 p.
12. *Hutton P. H.* Continuous AE monitoring of nuclear plants to detect flaws: status and future // *CSNI specialist meeting on continuous monitoring techniques for assuring coolant circuit integrity, London, 12 Aug 1985; Report PNL-SA-13336.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1985. – 14 p.
13. *Hutton P. H.* On-line acoustic emission monitoring of nuclear reactor systems – status and future // *J. of Acoustic Emission.* – 1985. – **4** – P. S74–S76.
14. *Hutton P. H., Kurtz R. J., Pappas R. A.* Acoustic emission for on-line reactor pressure boundary monitoring // *Research Report PNL-SA-12195.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1985. – 5 p.
15. *Hutton P. H., Kurtz R. J.* Acoustic emission for on-line reactor monitoring: Results of intermediate vessel test monitoring and reactor hot functional testing // *Nuclear Eng. and Design.* – 1985. – **86**. – P. 3–11.
16. *Acoustic emission results obtained from testing the ZB-1 Intermediate scale pressure vessel / P.H. Hutton, R.J. Kurtz, R.A. Pappas et al. / Research Report NUREG/CR-3915, PNL-5184.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1985. – 240 p.
17. *Hutton P. H., Kurtz R. J., Pappas R. A.* Acoustic emission monitoring of ZB-1 Intermediate scale vessel test // *Nuclear Eng. and Design.* – 1985. – **84**. – P. 171–178.
18. *Hutton P. H., Friesel M. A., Kurtz R. J.* Progress for on-line acoustic emission monitoring of cracks in reactor systems // *Research Report PNL-SA-13350.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1985. – 18 p.
19. *Summary of detection, location and characterization capabilities of AE for continuous monitoring of cracks in reactors / P.H. Hutton, R.J. Kurtz, M.A. Friesel et al. // Proc. of the 12th Water reactor safety research information meeting; USNRC Conference Proceedings NUREG/CP-0058.* – 1985. – **4**. – P. 362–380.
20. *Hutton P. H., Kurtz R., Friesel M. A.* Progress for on-line acoustic emission monitoring of cracks in reactor systems // *Proc. of the 13th Water reactor safety research information meeting; USNRC Conf. Proc. NUREG/CP-0072.* – 1986. – **2**. – P. 553–564.
21. *Hutton P. H., Friesel M.A., Kurtz R.* Progress for on-line acoustic emission monitoring of cracks in reactor systems // *Proc. of the 14th Water reactor safety research information meeting; USNRC Conf. Proc. NUREG/CP-0082.* – 1987. – Vol. 2. – P. 43–56.
22. *Hutton P. H., Friesel M. A., Kurtz R. J.* On-line acoustic emission monitoring for crack growth in LWRs // *Proc. of the 15th Water reactor safety research information meeting; USNRC conf. Proc. NUREG/CP-0091.* – 1988. – **2**. – P. 333–342.
23. *Doctor S. R., Taylor T. T., Hutton P. H.* Overview of NRC funded NDE research at US Pacific Northwest laboratory // *Nuclear Eng. and Design.* – 1985. – **87**. – P. 207–214.
24. *Hutton P. H.* Acoustic emission/flaw relationship for in-service monitoring of nuclear pressure vessels: Progress report // *Research Report NUREG/CR-4300; PNL-5511.* – Vol. 3, No. 2. – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1987. – 13 p.
25. *Hutton P.H., Kurtz R.J., Friesel M.A.* Progress for on-line acoustic emission monitoring of cracks in reactor systems // *Nuclear Eng. and Design.* – 1987. – **98**. – P. 135–140.
26. *Acoustic emission system calibration at Watts Bar Unit 1 Nuclear Reactor / P.H. Hutton, M. A. Friesel, J.F. Dawson, J.C. Harris / Research Report NUREG/CR-5144, PNL-6549.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1988. – 32 p.
27. *Hutton P. H.* Acoustic emission for continuous monitoring of light-water reactor systems: a status review // *Materials Evaluation.* – 1988. – **46**, № 2. – P. 241–246.
28. *Hutton P. H.* An overview of development and application of acoustic emission methods in the United States // *Nuclear Eng. and Design.* – 1989. – **113**. – P. 59–69.
29. *Hutton P. H., Kurtz R. J., Friesel M. A.* Acoustic emission/flaw relationships for inservice monitoring of LWRs // *Research Report NUREG/CR-5645, PNL-7479.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1991. – 116 p.
30. *Hutton P. H.* Listening to reactor pressure boundaries for the sounds of cracks and leaks // *Nuclear Eng. Intern.* – 1993. – **38** – P. 38–40.
31. *Hutton P. H., Friesel M. A., Dawson J. F.* Continuous AE crack monitoring of a dissimilar metal weldment at Limerick Unit 1 // *Research Report NUREG/CR-5963, PNL-8844.* – Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1993. – 91 p.
32. *Inservice inspection code case acceptability; Regulatory guide 1.147; ASME Section XI; Division 1 / Office of Nuclear Regulatory Research, USNRC.* – Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission. – 1994. – Revision 11. – 10 p.
33. *Ohira T., Pao Y.-H.* Microcrack initiation and acoustic emission during fracture toughness tests of A533B // *Metallurgical Transaction.* – 1986. – 17A. – P. 843–852.
34. *Ohira T., Pao Y.-H.* Quantitative characterization of microcracking in A533B steel by acoustic emission // *Ibid.* – 1989. – 20A. – P. 1105–1114.
35. *Kussmaul K., Blind D., Jansky J.* Influence of repair welding on cyclic thermal shock behaviour of a RPV nozzle corner // *Intern. J. of Pressure Vessels and Piping.* – 1986. – **25**. – P. 89–109.



36. *Interpretation of crack propagation events on the basis of acoustic emission signals and other non-destructive test results concerning cracks in RPV nozzle under cyclic thermal shock loading* / G. Deuster, F. Walte, E. Waschkies, G.E. Neubrech // Nuclear Eng. and Design. – 1986. – **96**. – P. 381–394.
37. *Waschkies E., Hepp K., Hoeller P.* Monitoring thermal shock induced crack growth in a feed water nozzle corner of a reactor pressure vessel by acoustic emission // NDT Intern. – 1986. – **19**. – P. 197–202.
38. *Gries H., Waschkies E.* Results of acoustic emission during mechanical and thermal loadings of vessel components and their fracture mechanical interpretation // Nuclear Eng. and Design. – 1988. – **106**. – P. 399–403.
39. *A fracture mechanics interpretation of acoustic emission results* / G. E. Neubrech, F. Walte, E. Waschkies, M. Klein // Ibid. – 1989. – **112**. – P. 139–154.
40. *Deuster G., Brinette R.* Surveillance of defects under cyclic loads and during hot and cold hydro-tests by acoustic emission, UT and potential drop techniques (German HRD-programme) // Ibid. – 1991. – **128**. – P. 67–78.

First acoustic-emission (AE) measuring systems of commercial modification were developed, and correlations between AE signal parameters and fracture propagation characteristics were established in the first half of the XXth century. This was exactly the basis for awakening the interest of nuclear energy technology developers and operators to this new method, which will eventually become an effective addition to the existing technologies of non-destructive testing (NDT) for detection and monitoring of nuclear reactor body defects. In view of the extremely high requirements made to such facilities in terms of their quality and integrity, significant efforts were focused on AE method development and its introduction into industry already at the end of 1970ties. Practical realization of the techniques and means for AE monitoring and diagnostics of the condition of NPP reactor bodies confirmed the high effectiveness of the method, although different opinions were expressed on this subject at the start of their introduction. 40 References, 3 Figures.

Keywords: acoustic emission, fracture development indices, nuclear power technologies, defect detection and monitoring

Надійшла до редакції
10.09.2014

СЕМІНАР «СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ, НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

27 січня 2015 р. відбувся науково-практичний семінар «Стандартизація, сертифікація, новітні технології», організований Українським товариством неруйнівного контролю та технічної діагностики. Участь у заході взяли представники учбових та екзаменаційних центрів, органів сертифікації персоналу неруйнівного контролю (НК), експертно-технічних центрів, органів атестації випробувальних лабораторій.

В ході семінару розглядалися проблеми стандартизації в галузі НК в Україні, зокрема Закон України про стандартизацію, який набув чинності 3 січня 2015 р. Бурхливе обговорення викликало повідомлення про прийняття 22 європейських та міжнародних стандартів як національних стандартів України методом підтвердження з набранням чинності з 01.01.2016 р. Цей метод став одним із нових положень Закону про стандартизацію України, який передбачає прийняття стандартів «однією з мов відповідних міжнародних або регіональних організацій стандартизації». Тобто, зазначені стандарти прийняті в Україні англійською мовою. З повним списком стандартів, прийнятих відповідно до наказу Мінекономрозвитку України від 30.12.2014 р. №1494, можна ознайомитися на офіційному сайті міністерства.

Цікавою та інформативною була презентація на семінарі Настанови Європейської Федерації неруйнівного контролю (EFNDT) «Комплексна система якості НК», яка охоплює всі аспекти діяльності, що стосуються неруйнівного контролю в Європейському союзі, зокрема, системи незалежної сертифікації персоналу НК та сертифікації роботодавцем, вимоги до кваліфікації персоналу НК в авіаційній промисловості та атомній енергетиці, вимоги та порядок акредитації органів оцінки відповідності в ЄС, чинні європейські та міжнародні стандарти в галузі НК для всіх методів неруйнівного контролю та різних секторів промисловості, а також людський фактор, який впливає на результати контролю.

Темами обговорення також були питання акредитації органів сертифікації персоналу НК в Україні, вимоги до екзаменаційних центрів та центрів підготовки фахівців у цій сфері.

Друга частина семінару була присвячена останнім розробкам відділу «Неруйнівні методи контролю якості зварних з'єднань» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Учасникам семінару були продемонстровані прилади локального намагнічування з можливістю сканування поверхні, досягнення комп'ютерної радіографії без використання рентгеновської плівки та застосування низькочастотного ультразвукового контролю на об'єктах великої протяжності.

Учасники семінару в невимушеній атмосфері обговорили актуальні проблеми, з якими вони стикаються у повсякденній роботі, та шляхи їх вирішення, а також висловили побажання аби такі семінари стали традиційними.

Щунак С.О.
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ДАТЧИКАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ. Сообщение 1

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

Рассмотрены изгибные колебания твердой пластинки из сплава типа ЦТС с закрепленными и свободными краями. Показано, что изгибные колебания, образующиеся в результате единичного сосредоточенного удара в центре пластинки, приводят к появлению хаотически возникающих локальных всплесков ее поверхности. Последнее приводит к трудоемкому для обработки потоку информации, что необходимо учитывать при конструировании АЭ приборов повышенной информативности (АЭ датчиков), а также программного обеспечения. Библиогр. 11, рис. 6.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, волны деформаций, датчики акустической эмиссии

Одним из самых важных элементов датчиков акустической эмиссии, устанавливаемых на контролируемых конструкциях, является жесткая пластинка, которая может выступать как в качестве получателя, так и генератора акустических сигналов (рис. 1). От того, какого рода сигналы будет обрабатывать либо генерировать эта пластинка, существенно зависит информативность применяемого метода АЭ контроля, сложность программного обеспечения аппаратуры АЭ и быстродействие ее работы в режиме регистрации сигналов и оценки состояния контролируемой конструкции. Полагаем, что существенную роль в этом процессе играет способ закрепления пластинки в датчике, ее размеры, конфигурация и способ передачи сигнала от контролируемой конструкции [1–6, 10]. В общем случае колебания пластинки носят сложный характер. Это изгиб тонкой пластинки, продольные и поперечные колебания ее массы. Размер пластинки и способы ее закрепления определяют преобладание того или иного вида колебаний. Размеры пластинок и способы их закрепления могут выделить преимущество того или иного вида колебаний. В данной работе будут рассмотрены

колебания только изгибного типа с отношением диаметра пластинки к ее толщине равному, 10 и более.

Пусть в центре круглой пластины возник и исчез точечный источник возмущения. При этом не имеет значения происхождение этого источника. Это может быть как воздействие материала контролируемой конструкции, так и воздействие усилия, вызванного мгновенным разрядом электрического тока, применяемого, как правило, при периодической оценке исходных показателей акустических датчиков в процессе непрерывного мониторинга. Последнее может быть использовано при сканировании материала конструкций с целью выявления объема накопившихся в нем повреждений. Такая комбинированная оценка состояния материала методами АЭ и АЭ сканирования позволит более точно определить возможность конструкции нести рабочую нагрузку и выполнять свои служебные функции. Анализ возникновения и распространения упругих волн, а также влияние напряженно-деформированного состояния на распространение упругой волны проведем на примере пластины, подвергнутой удару в центре. Чтобы упростить анализ и получить выражения для прогиба пластины в аналитической форме, представим напряжения в пластине в виде равномерно распределенного сжатия или растяжения. Такое упрощение не исказит самой оценки влияния напряжения на изгиб пластины и позволит получить количественные результаты для рассматриваемого конкретного случая.

Воспользуемся полученным в работе [1] уравнением для определения прогибов при изгибе круглой пластины распределенной нагрузкой, считая, что начальный прогиб пластины отсутствует, а начальные деформации равномерно распределены по толщине пластины. Тогда уравнение для прогибов пластины можно переписать следующим образом:

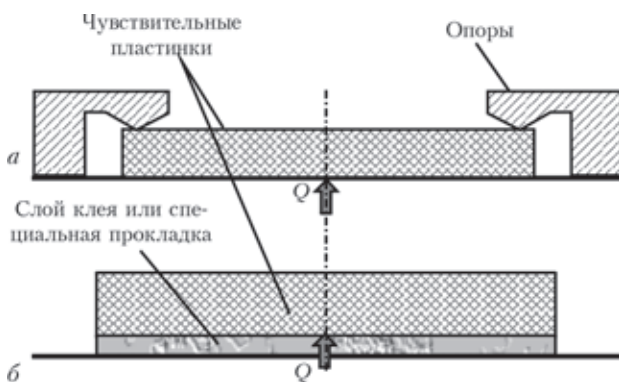


Рис. 1. Чувствительные пластинки: в опорах (а) и свободно лежащая на клеевой основе (б)



$$\frac{\partial^3 w}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\sigma_r \delta}{D} \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{1}{Dr} \int_0^r q^* r dr, \quad (1)$$

где w – прогиб пластины в направлении оси z , см; r – радиус вдоль поверхности пластины, см; t – текущее время, с; δ – толщина пластины, см; σ_r – суммарные напряжения, действующие в пластине вдоль радиуса r ; МПа; $D = E\delta^3/12(1 - \nu^2)$ – цилиндрическая жесткость пластины, кг·см; ν – коэффициент Пуассона; q^* – распределенная нагрузка, МПа.

Предположим теперь, что распределенная нагрузка q^* состоит из двух частей, т.е. имеет вид

$$q^* = q - \rho\delta(\partial^2 w / \partial t^2)/g, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала пластины, кг/м³, а второй член в правой части представляет собой динамическую составляющую нагрузки, вызванную силами инерции частиц пластины, быстро меняющих свое положение в направлении оси z .

Подставив выражение (2) в (1), получим:

$$\frac{\partial^3 w}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\sigma_r \delta}{D} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\rho\delta}{gDr} \int_0^r r \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dr = \frac{1}{Dr} \int_0^r r q dr.$$

Интегрирование такого уравнения затруднено из-за наличия интеграла от функции $\partial^2 w / \partial t^2$. Чтобы избавиться от интеграла в левой части представленного уравнения, перепишем уравнение следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 w - \frac{\sigma_r \delta}{D} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\rho\delta}{Drg} \int_0^r r \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dr = \frac{1}{Dr} \int_0^r r q dr,$$

где

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right).$$

Далее, умножим выражение на r и продифференцируем по r в предположении, что $\sigma_r = \text{const} = \sigma$:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \nabla^2 w \right) - \frac{\sigma\delta}{D} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\rho\delta}{Dg} r \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{qr}{D}.$$

Поделив это выражение на r , окончательно получим:

$$\nabla^2 \nabla^2 w - \frac{\sigma\delta}{D} \nabla^2 w + \frac{\rho\delta}{Dg} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{q}{D}.$$

Представив нагрузку q , приложенную в центре пластины в виде произведения δ -функций по радиусу и времени, получим основное расчетное уравнение

$$\nabla^2 \nabla^2 w - \frac{\sigma\delta}{D} \nabla^2 w + \beta^4 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{Q}{2\pi D} \frac{\delta(r)}{r} \delta(t) \quad (A)$$

(Q – импульс силы при ударе по поверхности пластины, кг·с; $\beta^4 = \rho\delta/Dg$) со следующими начальными и граничными условиями:

$$w = 0 \text{ при } t = 0;$$

$$w = 0 \text{ при } r = \infty;$$

$$\partial w / \partial r = 0 \text{ при } r = \infty \text{ и } r = 0.$$

Выполнив прямые преобразования Ханкеля [1] по r и Лапласа по t [7], получим:

$$(\alpha^4 + \alpha^2 \sigma\delta / D + \beta^4 p^2) \bar{w} = Q / 2\pi D.$$

Тогда

$$\bar{w} = \frac{Q}{2\pi D} \frac{1}{\alpha^4 + \alpha^2 \frac{\sigma\delta}{D} + \beta^4 p^2}.$$

После выполнения обратного преобразования Лапласа:

$$\bar{w} = \frac{Q}{2\pi D \beta^2} \frac{\sin \left[\frac{\alpha t}{\beta^2} \sqrt{\alpha^2 + \frac{\sigma\delta}{D}} \right]}{\alpha \sqrt{\alpha^2 + \frac{\sigma\delta}{D}}} \text{ для } \alpha^2 + \sigma\delta/D > 0;$$

$$\bar{w} = \frac{Q}{2\pi D \beta^2} \frac{\text{sh} \left[\frac{\alpha t}{\beta^2} \sqrt{\alpha^2 + \frac{\sigma\delta}{D}} \right]}{\alpha \sqrt{\alpha^2 + \frac{\sigma\delta}{D}}} \text{ для } \alpha^2 + \sigma\delta/D < 0.$$

Выполнив обратное преобразование Ханкеля, получим:

для $1 + \sigma\delta/\alpha^2 D > 0$

$$w = \frac{Q}{2\pi D \beta^2} \int_0^\infty \frac{\sin \left[\frac{\alpha^2 t}{\beta^2} \sqrt{1 + \frac{\sigma\delta}{\alpha^2 D}} \right]}{\alpha \sqrt{1 + \frac{\sigma\delta}{\alpha^2 D}}} J_0(\alpha r) d\alpha;$$

для $1 + \sigma\delta/\alpha^2 D < 0$

$$w = \frac{Q}{2\pi D \beta^2} \int_0^\infty \frac{\text{sh} \left[\frac{\alpha^2 t}{\beta^2} \sqrt{1 + \frac{\sigma\delta}{\alpha^2 D}} \right]}{\alpha \sqrt{1 + \frac{\sigma\delta}{\alpha^2 D}}} J_0(\alpha r) d\alpha.$$

В случае, когда $\sigma = 0$ (в пластине отсутствуют напряжения), значение w можно получить в замкнутом виде:

$$w = \frac{Q}{2\pi \beta^2 D} \int_0^\infty \frac{J_0(\alpha r)}{\alpha} \sin \left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} t \right) d\alpha. \quad (3)$$

Возьмем этот интеграл следующим образом. Сначала продифференцируем выражение (3) по t . Тогда, после дифференцирования и интегрирования [9] получим:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{Q}{2\pi D\beta^4} \int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) \cos\left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} t\right) d\alpha = \frac{Q}{4\pi D\beta^2 t} \sin\left(\frac{r^2\beta^2}{4t}\right).$$

Интегрируя по t от 0 до t , возвращаемся к значению w :

$$w = \frac{Q}{4\pi D\beta^2} \int_0^t \sin\left(\frac{r^2\beta^2}{4t}\right) \frac{dt}{t} = \frac{Q}{4\pi D\beta^2} \left[\frac{\pi}{2} - \text{Si}\left(\frac{r^2\beta^2}{4t}\right) \right], \quad (4)$$

где $\text{Si}\left(\frac{r^2\beta^2}{4t}\right)$ – интегральный синус, стремящийся к $\pi/2$ при $t \rightarrow 0$.

В данной статье расчеты проведем для случая, когда напряжения в пластинке отсутствуют.

На рис. 2 представлены графики зависимости величины w от времени t , полученные по

формуле (4) для пластинки бесконечных размеров. Количественные результаты расчетов получены с помощью специально разработанной компьютерной программы, оптимизированной для вычисления интегралов и числовых рядов конкретного типа.

Выражение (4) и рис.2 дают представление о форме и амплитудах волны, распространяющейся по пластине вдоль ее радиуса. Из рисунка видно, как волна из многопиковой постепенно с течением времени превращается в пологую, окончательно формирующую поверхность пластины при $t = \infty$. Однако следует отметить, что пластинки, устанавливаемые в датчиках, имеют ограниченные размеры и установлены либо «на опорах», либо лежат на горизонтальной поверхности на упругом основании, например, в виде клеевой прослойки или специальной прокладки (рис. 1). В первом случае колебания закрепленных концов пластинки и моменты на опорах при $r = r_0$ должны быть равны нулю. Однако решение задачи при таких граничных условиях достаточно громоздко и трудно реализуемо на современных персональных компьютерах [6]. Кроме того, анализируя варианты закрепления чувствительной пластинки в корпусе АЭ датчика (например, рис. 1), можем прийти к выводу, что обеспечить заданные граничные условия на практике достаточно сложно, так как элементы крепления пластинки и корпус датчика представляют одно жесткое целое. Последнее весьма существенно для колеблющихся пластин. В то же время расчеты, выполненные в квазистатической постановке задачи для граничных условий $w = 0$ и $M_r = 0$ при $r = r_0$, показывают, что влияние этого фактора на прогибы пластинки незначительно. Учитывая изложенное, расчеты будем выполнять для случая, когда только

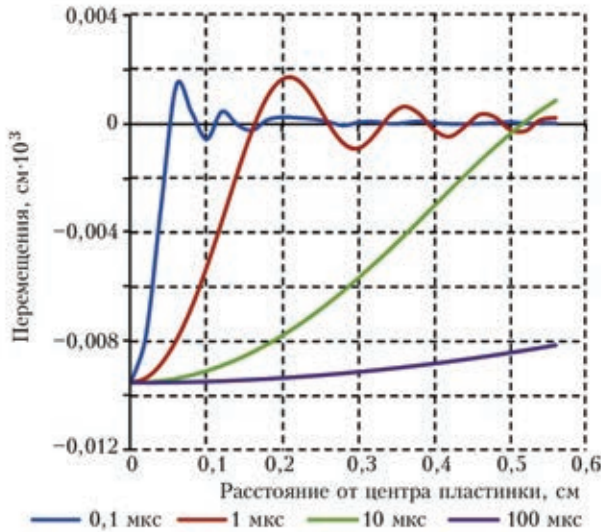


Рис. 2. Колебания поверхности свободной пластинки больших размеров

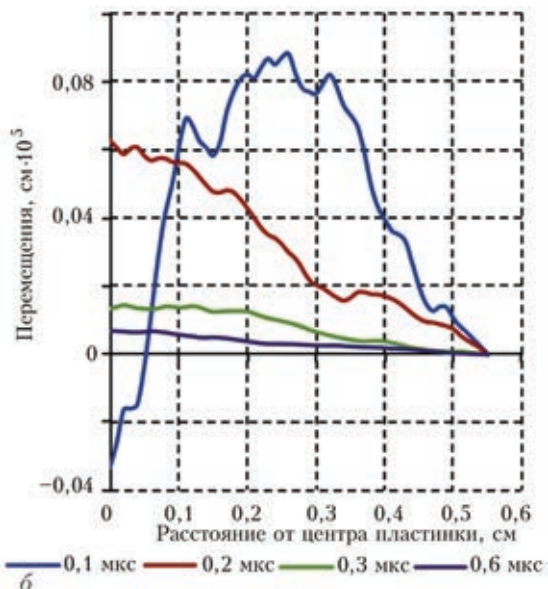
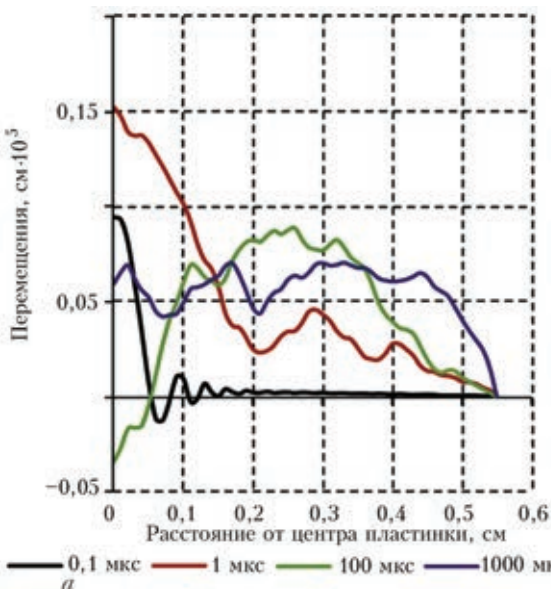


Рис. 3. Колебания пластинки с закрепленными краями в зависимости от времени (а) и толщины (б) (графики на этом рисунке представлены для 0,0001 с после начала действия источника)



$w = 0$ при $r = r_0$, что четко может быть обеспечено конструкцией датчика. Тогда, используя подход [1, 7, 8], решение уравнения (А) будем искать, применив преобразование Лапласа и конечное преобразование Ханкеля. После выполнения прямых и обратных преобразований Лапласа и Ханкеля и учета граничного условия $w = 0$ при $r = r_0$, выражение для расчета w получим в виде ряда:

$$w = \frac{Q}{\pi D \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{\alpha_n^2 t}{\beta^2}\right)}{\alpha_n^2 r_0^2 J_1^2(\alpha_n r_0)} J_0(\alpha_n r), \quad (5)$$

где величины α_n определяются как корни спектрального уравнения $J_0(\alpha_n r_0) = 0$.

Полученное выражение (5) отличается от (4) наличием дискретных значений α_n , что свидетельствует о том, что часть волн, определяемых бесконечным преобразованием Ханкеля, отсутствуют из-за наличия границ пластинки. На рис. 3 представлены расчеты перемещений, выполненные по формуле (5), показывающие колебания пластинок в зависимости от времени и толщины. Из графиков в правой части рисунка видно, что с увеличением толщины пластинки уменьшаются ее прогибы. Результаты расчетов получены для физических постоянных $E = 5 \cdot 10^3$ МПа; $\rho = 3,7 \cdot 10^{-3}$ кг/см³; $g = 0,981 \cdot 10^3$ см/с²; $k = 0,458$ кг/см³ и нагрузки $Q = 1 \cdot 10^{-8}$ кг·с:

$$\beta^2 = \sqrt{\frac{\rho \delta}{gD}} = 287 \cdot 10^{-6}; 144 \cdot 10^{-6}; 95,7; 71,8; 48 \cdot 10^{-6} \text{ (см/с}^2\text{)}$$

для $\delta = 0, 1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$ см;

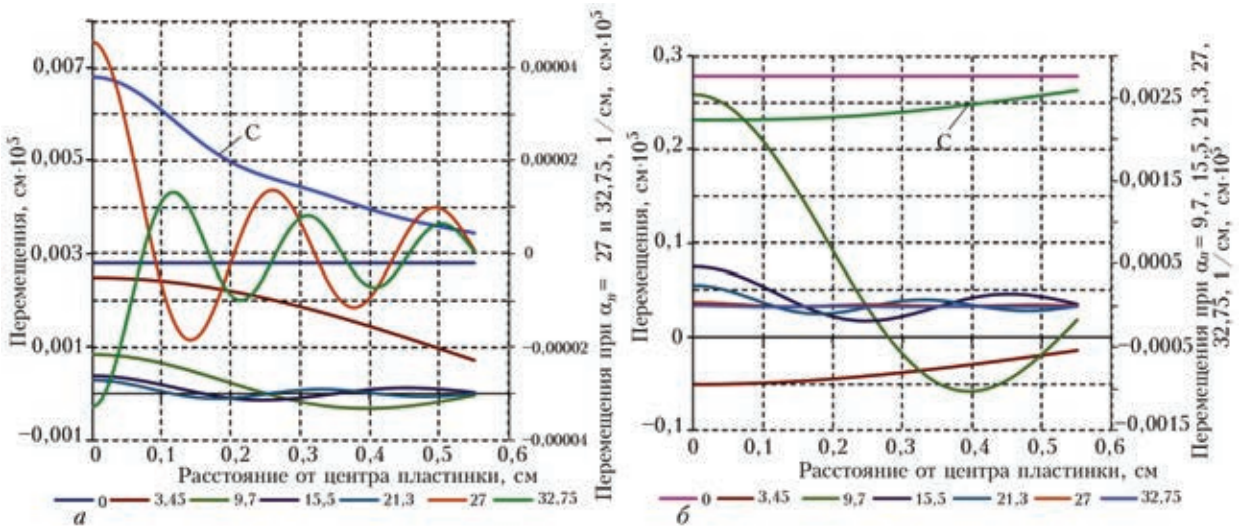


Рис. 4. Колебания пластинки толщиной 0,1 см конечных размеров на мягкой клеевой основе в зависимости от волнового числа α_n в момент, когда $t = 1$ (а) и 100 мкс (б). Колебания более высоких частот представлены отдельно с дополнительной осью ординат (справа). ($K = 0,458$ кг/см³; C – суммарные колебания)

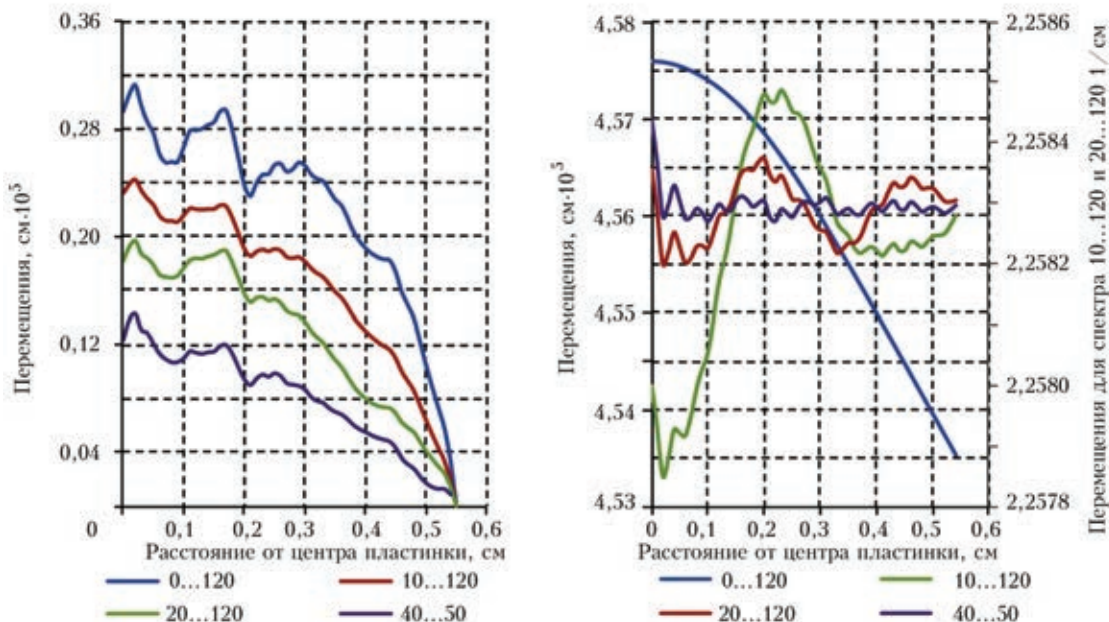


Рис. 5. Колебания пластинки толщиной 0,1 см, закрепленной на опорах (а) и наклеенной (б) в диапазоне волновых чисел (приведенных под графиками), для времени 0,001 с после прекращения действия источника возбуждения



$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)} = 4,58; 36,6; 123,6; 293; 989 \text{ (кгс} \cdot \text{м)}$$

для $\delta = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6$ см.

Характер перемещений остается типичным для такого рода пластин. Если в пластинке больших размеров по радиусу возникает бегущая волна в направлении радиуса, то в пластинках ограниченных размеров закрепление краев влияет на характер ее колебаний. Отраженная от края пластинки волна искажает кривую колебаний, придавая ей характер многопиковой с большим числом явно выделяемых колебаний.

Теперь рассмотрим колебания пластинки, закрепленной на поверхности акустического датчика с помощью клея или другим способом (рис. 1, б) – т. е. пластинки на упругом основании. В этом случае необходимо скорректировать основное дифференциальное уравнение изгиба, введя в него член, учитывающий сопротивление материала крепления пластинки ее перемещениям. После корректировки уравнение (А) примет вид:

$$\nabla^2 \nabla^2 w + \frac{k}{D} w + \beta^4 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{Q}{2\pi D} \frac{\delta(r)}{r} \delta(t).$$

Здесь k – сила сопротивления крепежной основы колебаниям пластинки датчика, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2 \cdot \text{см}}$. Преобразованное выражение для прогибов будет:

$$w = \frac{Q}{2\pi D} \frac{1}{\alpha^4 + \frac{k}{D} + \beta^4 p^2}.$$

Напряжения σ для этого случая приняты равными нулю. Граничные условия задачи могут быть выражены отсутствием моментов M_r и перерезывающей силы на краю пластинки. Последняя отсутствует в связи с особенностями приложения нагрузки $[\delta(t)]$. Другими словами, $\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} = 0$ при $r = r_0$. Обратный выход преобразованием Ханкеля может быть сделан по формуле конечного преобразования по несколько видоизмененной формуле и другими условиями определения коэффициентов α_n . В данном случае условие, когда на краю пластинки отсутствуют моменты, может быть представлено выражением [3]:

$$\alpha_n J_1(\alpha_n r_0) + h J_0(\alpha_n r_0) = 0, \text{ где } h = -\frac{\alpha_n^2 r_0}{(1+\nu)},$$

а формула для расчета перемещений примет вид:

$$w = \frac{Q}{\pi D \beta^2 r_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{t}{\beta^2} \sqrt{\alpha^4 + \frac{k}{D}}\right) J_0(\alpha_n r)}{\left[1 + \frac{\alpha_n^2 r_0^2}{(1+\nu)^2}\right] J_0^2(\alpha_n r_0) \sqrt{\alpha^4 + \frac{k}{D}}}.$$

Графики перемещений (колебаний) для лежащей на клеевой основе пластинки представлены на рис. 4. Следует отметить, что характер колебаний пластинки остается типичным. Показана в увеличенном масштабе типичная картина колеблющейся пластинки в момент, когда $t = 1$ (а) и 100 (б) мкс. Все остальные срезы по времени дают примерно ту же картину. Существенно изменяется только амплитуда колебаний. Особенностью колебаний наклеенной пластинки является то, что пластинка еще и перемещается параллельно самой себе в режиме колебаний (параллельные оси абсцисс линии). Таким образом, можно говорить о суммарных колебаниях пластинки как единого целого плюс колебания местные, такие, как показаны на рис. 4 в увеличенном масштабе со шкалой оценок с правой стороны. Амплитуды местных колебаний характерны, но меньше, чем в пластинках, где свобода перемещений ограничена (см. рис. 3). Следует также отметить, что свободно лежащие на клеевой основе пластинки с увеличением толщины увеличивают общие и местные перемещения.

Рассмотрим также скорости колебаний пластинки, закрепленной на краях с условием, что $w = 0$ при $r = r_0$. Для этого продифференцируем выражение (5) по переменной t и:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{Q}{\pi D r_0^2 \beta^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{\alpha_n^2 t}{\beta^2}\right)}{J_1^2(\alpha_n r_0)} J_0(\alpha_n r). \quad (5)$$

Спектральное уравнение для граничных условий $w = 0$ при $r = r_0$ будет: $J_0(\alpha_n r_0) = 0$.

Следует отметить существенное влияние диапазона частот по волновым числам α , в которых суммируются элементарные волны, возбуждаемые источником Q , на амплитуды результирующих сигналов акустической эмиссии. Выборочное суммирование может быть осуществлено путем фильтрации исходного сигнала, вошедшего в прибор. Фильтрация может осуществляться как математическим путем, так и машинным в зависимости от удобства. На рис. 5 представлены зависимости амплитуд колебаний, генерируемые чувствительной пластинкой толщиной 0,1 см при различных диапазонах волновых чисел. Видно, что диапазон фильтрации сигналов может достаточно сильно изменить суммарный сигнал. Измерение в узком диапазоне волновых чисел (частот) уменьшает результирующий сигнал и чем уже полоса фильтрации, тем меньше сигнал. Это хорошо видно на рис. 5. Можем отметить, что фильтрация информации позволяет варьировать потоком текущей информации для получения необходимой для каждого конкретного случая результатов измерения АЭ. Таким образом, искусственное «вымыва-

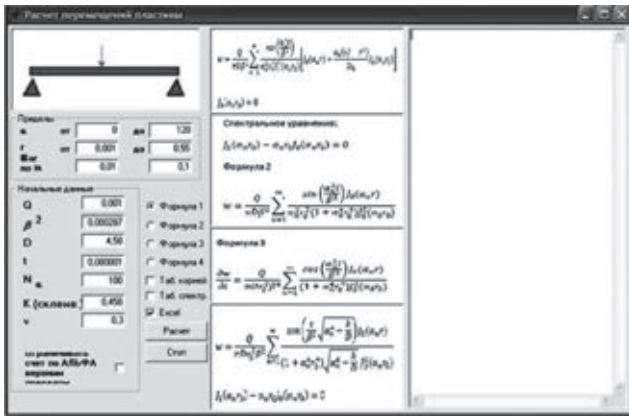


Рис. 6. Окно программы расчета перемещений w , вызванных силой Q

ние» (физическое или программное) элементарных волн из общей суммы волн, формирующих сигнал, приводит к изменению формы и уменьшению амплитуд колебаний пластинки и зарегистрированных сигналов АЭ.

В заключение можно сказать, что варьируя граничными условиями и способом крепления чувствительных пластинок к контактной поверхности АЭ датчиков, можно в широких пределах изменять их характеристики.

Отметим, что выполнение приведенных в статье расчетов потребовало создания специальной компьютерной программы, позволившей оптимизировать выполнение операций по времени и быстро получать необходимый результат.

Программа обеспечила автоматический вывод данных расчетов в виде таблиц и графиков *Excel*, что дало возможность легко изменять требуемые параметры, эффективно оперировать данными и получать их удобное и наглядное графическое представление при оформлении отчетов и подготовке статей (рис. 6).

Выводы

Проведено моделирование расчетным путем перемещений, возникающих в тонких пластинках от сосредоточенного действия мгновенно прило-

женной в центре силы, при различных способах их закрепления в корпусе АЭ датчика.

Показано, что форма колебаний жестко закрепленной пластинки конечного размера отличается от формы колебаний в случае ее крепления на клеевой основе, а также от формы колебаний пластинок бесконечно большого диаметра. С увеличением толщины пластинок изгибные колебания резко уменьшаются.

На основе выполненных расчетов установлено, что выборочная фильтрация отдельных составляющих сигнала АЭ приводит к уменьшению регистрируемого суммарного сигнала АЭ.

Результаты исследований могут быть использованы при конструировании специализированных АЭ датчиков повышенной информативности за счет выбора наиболее эффективных размеров чувствительных элементов, специальной конструкции закрепления пластинок и способа передачи информации чувствительной пластинке от контролируемой конструкции. Более сложные способы передачи нагрузки чувствительным пластинкам, нежели в приведенном решении, можно получить на его основе путем суперпозиции.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
2. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. – М.: Физматгиз. – Т.1, 1960. – 380 с.; Т.2, 1965. – 480 с.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
4. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
5. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. – М.: ФМ, 1963. – 636 с.
6. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
7. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
8. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
9. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1971. – 1108 с.
10. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.

Bending vibrations of a hard plate from TsTS type alloy with restrained and unrestrained edges are considered. It is shown that bending vibrations, forming as a result of a single concentrated impact in the plate center, lead to appearance of chaotically generated local splashes on its surface. The latter leads to appearance of a difficult to process data flow that should be taken into account when designing AE instruments with increased level of informativity (AE sensors and software). 11 References, 6 Figures.

Keywords: acoustic emission, deformation waves, acoustic emission sensors

Поступила в редакцию
29.05.2014



СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В. А. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ¹, Р. О. ПАСТОВЕНСКИЙ², Д. С. ШИЛО²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Обзор посвящен наиболее применяемым современным системам радиационного неразрушающего контроля. Предложена классификация радиационных систем неразрушающего контроля. Рассмотрены как традиционные системы с промежуточными носителями информации (пленочная радиография, электрорадиография, компьютерная радиография), так и перспективные цифровые системы реального времени без промежуточных носителей информации. Библиогр. 26, табл. 8, рис. 13.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, флэш-радиография, цифровая радиография, рентгенотелевизионная система, рентгеновский электронно-оптический преобразователь, сцинтилляционный экран, ПЗС-матрица, плоскпанельный детектор

Среди методов неразрушающего контроля (НК) качества материалов и изделий значительное место занимает радиационный контроль с использованием рентгеновского и гамма-излучения. Радиационные методы НК применимы к изделиям из любых материалов и превосходят полнотой информации о дефектах (тип, форма, размеры, место расположения) другие виды НК: магнитный, акустический, вихретоковый и др. Радиационным методам и системам отдают предпочтение при контроле качества сварных и паяных соединений; контроле качества литья, газо- и нефтепроводов; элементов и конструкций автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта; агрегатов химического и энергетического машиностроения.

В последние годы произошли качественные изменения в системах радиационного НК прежде всего благодаря появлению новых многоэлементных полупроводниковых детекторов радиационных изображений, а также интенсивному внедрению цифровых технологий получения, обработки и анализа изображений. При использовании таких детекторов и цифровых технологий ионизирующее излучение, прошедшее через контролируемый объект, с помощью электронных средств преобразуется в массив электрических сигналов, которые затем оцифровываются, обрабатываются и используются для формирования цифрового изображения контролируемого объекта. Цифровое изображение объекта содержит информацию о его внутренней структуре и может формироваться непосредственно во время просвечивания, т. е. в реальном времени. Такой метод радиационного контроля называют цифровой радиографией или флэш-радиографией [1–3].

Отличительной особенностью флэш-радиографии является отсутствие промежуточных носителей информации (радиографических пленок, полупроводниковых селеновых пластин, запоминающих пластин с фотостимулируемой памятью), которые требуют длительных операций экспонирования, обработки и считывания информации. Соответственно отсутствие таких промежуточных носителей позволяет значительно повысить производительность и снизить стоимость радиационного контроля.

Целью данной статьи является обзор применяемых в настоящее время систем радиационного НК. Рассмотрены как традиционные системы с промежуточными носителями информации, так и новые перспективные системы для цифровой радиографии.

Классификация систем радиационного НК. Системы радиационного НК состоят из трех основных частей: источника ионизирующего излучения, контролируемого объекта и детектирующего устройства. В зависимости от типа применяемого детектирующего устройства системы радиационного НК можно классифицировать следующим образом (рис. 1): системы с промежуточными носителями информации и системы реального времени без промежуточных носителей информации. Системы с промежуточными носителями называют также системами с запоминанием изображения.

В системах с запоминанием изображения радиационное изображение детектируется и запоминается на каком-либо носителе (радиографическая пленка, электрорадиографическая пластина, запоминающая пластина с фотостимулируемой памятью). Такие системы могут выполнять радиационный контроль только неподвижных объектов.

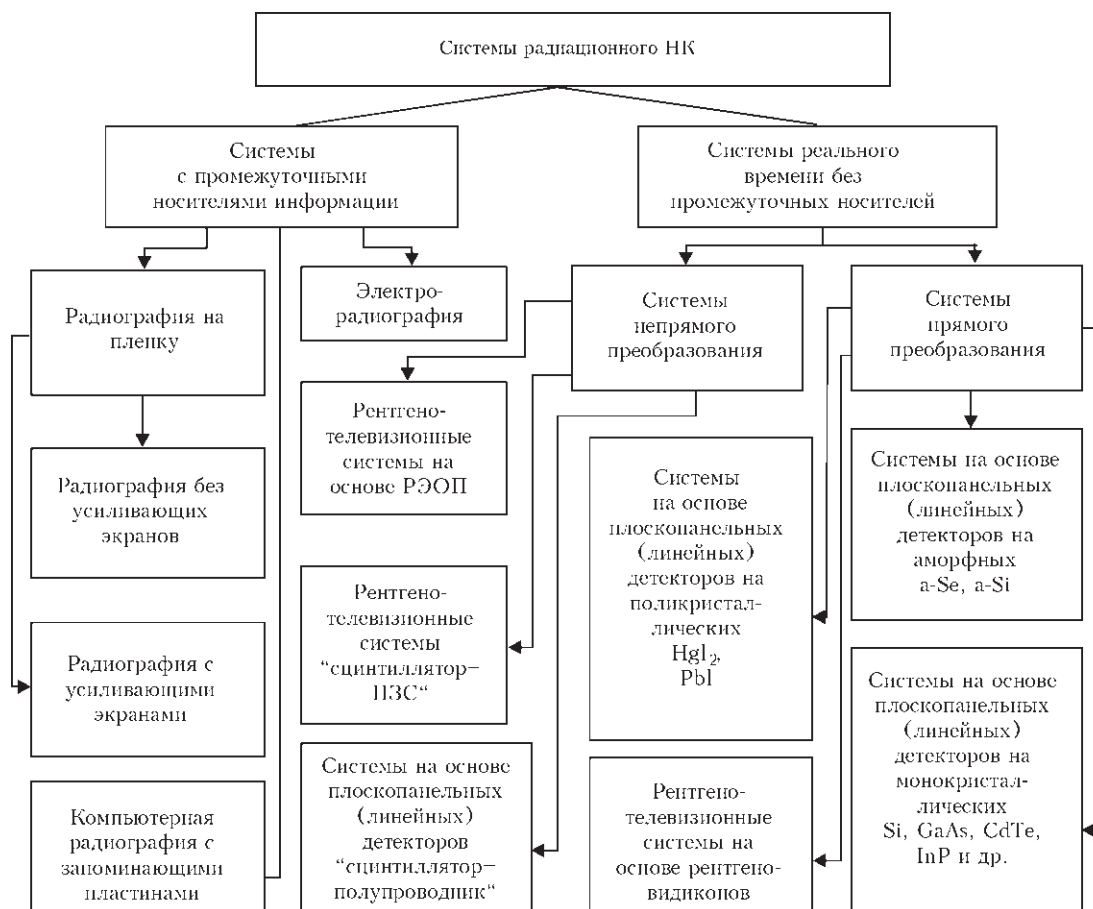


Рис. 1. Классификация систем радиационного НК

Системы реального времени без промежуточных носителей информации позволяют выполнять радиационный контроль как неподвижных, так и подвижных объектов в реальном времени.

К системам с промежуточными носителями информации относятся пленочная радиография, электрорадиография и компьютерная радиография на основе запоминающих пластин.

Радиографические системы на основе пленки. Радиографическая пленка до сих пор является наиболее широко используемым детектором ионизирующего излучения с большим содержанием серебра (5...10 г/м²). Изображение контролируемого объекта формируется на пленке, представляющей собой прозрачную основу с нанесенным на нее желатином с суспензией кристаллов галогенида серебра (AgBr). После просвечивания проводится химическая обработка пленок и считывание информации, компьютерная обработка информации, утилизация пленок с целью регенерации серебра. К достоинствам пленочной радиографии следует отнести высокую относительную чувствительность контроля (1 %) в широком диапазоне толщин контролируемых объектов, высокую разрешающую способность (20 пар лин./мм), большой размер рабочего поля, возможность получения в результате контроля документа и т.д.

Радиографические пленки делят на два класса: предназначенные для использования без усиливающих экранов и пленки для использования с усиливающими экранами. Параметры некоторых безэкранных и экранных пленок приведены соответственно в табл. 1 и 2 [4].

Наиболее существенным отличием между различными пленками является размер зерна кристаллов галогенида серебра. Пленки, использующиеся без усиливающих экранов, дают более качественное изображение, но из-за малого размера зерна нуждаются в больших дозах излучения. Чувствительность отечественных пленок принято характеризовать обратной величиной экспозиционной дозы излучения, выраженной в рентгенах, которая необходима для превышения оптической плотности почернения пленки на 0,85 ед. над плотностью неэкспонированной пленки (вуали).

Импортные пленки характеризуют относительным экспозиционным фактором по отношению к определенной пленке, принятой за эталон. Среди пленок марки STUCTURIX фирмы «Agfa-Gevaert» (Бельгия) такой эталонной является пленка D7 (табл. 1). Пространственная разрешающая способность радиографических пленок может достигать 20 пар лин./мм.

Усиливающие экраны подразделяют на металлические, флуоресцентные и флуорометаллические.



Таблица 1. Радиографические пленки, используемые без усиливающих экранов

Тип пленки	Фирма (страна)	Чувствительность		Коэффициент контрастности
		P^{-1}	Отн. ед.	
PT-1	ОАО «ТАСМА» (Россия)	25,0...27,0	–	4,2...4,4
PT-1B	– « –	35,0...37,0	–	4,0...4,1
PT-K	– « –	6,0...7,0	–	4,5...4,7
PT-7T	– « –	8,0...9,0	–	4,7...4,9
STUCTURIX D2	Agfa-Gevaert (Бельгия)	1,2...1,5	0,1...0,12	5,8...6,0
STUCTURIX D3	– « –	2,0...2,5	0,2–0,25	5,0...5,5
STUCTURIX D4	– « –	3...4	0,3...0,4	5,0...5,4
STUCTURIX D5	– « –	5...7	0,6...0,7	5,0...5,4
STUCTURIX D7	– « –	10...12	1	4,9...5,4
STUCTURIX D8	– « –	15...18	1,5	4,3...4,8
STUCTURIX D6R	– « –	18...20	1,8...2,0	4,2
IX 80	FUJIFILM (Япония)	4...5	0,4...0,5	5,5
IX 100	– « –	10...12	1	5,2
IX 150	– « –	15	1,5	4,8
AA400	Kodak (США)	10...12	1	4,3
T200	– « –	6...7	0,6	6
MX125	– « –	4...5	0,4...0,5	6
INDUX R5	Foma Bohemia (Чехия)	6...7	0,7	5,5...5,9
INDUX R7	– « –	10...12	1	5,0...5,4

ские. Усиливающее действие металлических экранов основано на дополнительном экспонировании пленки вторичными электронами, выбитыми ионизирующим излучением из тонкой свинцовой или свинцово-оловянной фольги металлического экрана. Эти электроны практически полностью поглощаются пленкой, повышая ее плотность почернения. Коэффициент усиления металлических экранов, равный отношению длительности экспозиции без экрана и с ним, может достигать до 2,0...2,5. Совместно с пленкой обычно используют пару экранов, размещая их по обе стороны пленки.

Усиливающее действие флуоресцентных экранов основывается на преобразовании люминофором экрана части ионизирующего излучения в оптическое. Пленка поглощает приблизительно 1 % рентгеновского излучения, достигающего к ней, в то время как рентгеновский экран поглощает значительно большую его часть (до 20 %), а свечение экрана почти полностью поглощается пленкой. Благодаря этому значение коэффициента усиления таких экранов достигает нескольких десятков и больше, соответственно значительно сокращается время экспозиций. Однако значительное уменьшение времени экспозиции при использовании

флуоресцентных экранов сопровождается потерей разрешающей способности системы экран-пленка. Основной причиной этого является большой размер зерна люминофора. Средний размер зерна безэкранной пленки составляет порядка 0,5 мкм, экранной пленки 1...1,5 мкм, а размер зерна флуоресцентных экранов равен около 10 мкм, т.е. приблизительно на порядок больше.

Наиболее распространенные флуоресцентные экраны на основе вольфрамата кальция $CaWO_4$ сейчас вытесняются более эффективными экранами на основе оксисульфидов гадолиния, лантана, иттрия. Используются они в комплекте, состоящем из двух экранов – переднего и заднего. Обычно задний экран имеет большую толщину.

Флуорометаллические экраны сочетают в себе слой свинцовой фольги со слоем люминофора, т.е. являются комбинацией металлического и флуоресцентного экранов. Такие экраны дают существенное снижение времени экспозиции пленки, незначительно ухудшая ее разрешающую способность. Параметры некоторых флуоресцентных и флуорометаллических усиливающих экранов приведены в табл. 3.

Усиливающие экраны вместе с пленкой пакуют в гибкие светонепроницаемые кассеты с карманами

Таблица 2. Радиографические пленки, используемые с усиливающими экранами

Тип пленки	Фирма (страна)	Чувствительность, P^{-1}	Средний градиент	Примечание
PT-1	ОАО «ТАСМА» (Россия)	–	2,0...2,5	С экраном ВП-1
STUCTURIX F8	Agfa-Gevaert (Бельгия)	50...300	4,6	С экраном RCF
STUCTURIX D6R	– « –	30...100	6,0	– « –
IX 100HD	FUJIFILM (Япония)	11	4,1	Без экрана
HS800	Kodak (США)	18...20	4,3	– « –
FOMADUX RX-8	Foma Bohemia (Чехия)	16...18	4,6...4,8	– « –



Таблица 3. Флуоресцентные и флуорометаллические усиливающие экраны

Тип экрана	Люминофор	Коэффициент усиления	Фирма (страна)
ЭУ-В1	CaWO ₄	30	Россия
ЭУ-В2	- « -	40	- « -
ЭУ-В3	- « -	50	- « -
ВП-1	- « -	80...100	- « -
ВП-2	- « -	130...160	- « -
ЭУ-И1	Y ₂ O ₂ S-Tb	50	- « -
RCF	CaWO ₄	5...30	Agfa-Gevaert (Бельгия)
Kyokko SMP-308	- « -	16...24 для безэкранных пленок; 105...165 для экранных пленок	Kasei Optonix (Япония)

для маркирующих знаков, эталонов. Пространственная разрешающая способность радиографических систем экран-пленка составляет 8...10 пар лин./мм.

Технологический процесс пленочной радиографии включает следующие процедуры: зарядка кассет, просвечивание контролируемого объекта и экспонирование пленки, химическая обработка пленки, ее сушка, анализ результатов с помощью негатоскопа, компьютерное сканирование, утилизация отходов. Поэтому пленочная радиография наиболее трудоемка, имеет малую производительность и высокую стоимость. Объемы применения пленочной радиографии с каждым годом уменьшаются в связи с появлением и совершенствованием новых систем детектирования радиационных изображений.

Электрорадиография. Относительно недавно много надежд возлагалось на электрорадиографию или ксерорадиографию [5]. При проведении электрорадиографического контроля используют полупроводниковые селеновые пластины, состоящие из металлической алюминиевой подложки, на которую в вакуумных условиях путем термического испарения нанесен слой фотополупроводника – аморфного селена. Толщина селенового слоя составляет 100...500 мкм.

Процесс получения электрорадиограммы состоит из следующих этапов. Для придания пластине с полупроводниковым слоем чувствительности на поверхность слоя наносится равномерный по площади электрический заряд. В процессе нанесения заряда высокое напряжение (5...7 кВ) подводится к электродам, размещенным над пластиной. В воздушном промежутке между электродами и слоем селена возникает коронный разряд. Образовавшиеся в процессе разряда ионы воздуха оседают на селеновом слое. В зависимости от полярности напряжения, подаваемого на электроды, на поверхность селенового слоя может быть нанесен либо положительный, либо отрицательный потенциал относительно подложки. После зарядки пластину закрывают светонепроницаемым кожухом и она готова к экспонированию.

Экспонирование заряженной пластины осуществляется ионизирующим излучением, прошедшим через контролируемый объект. Взаимодействуя с

селеновым слоем, излучение генерирует свободные носители заряда (электронно-дырочные пары) и уменьшает его электрическое сопротивление. В результате уменьшения сопротивления нейтрализуется заряд, нанесенный на слой. Причем нейтрализация заряда в первом приближении пропорциональна интенсивности излучения, взаимодействующего с пластиной. В результате на поверхности фотополупроводникового слоя образуется скрытое электростатическое изображение, которое проявляется при опылении поверхности селенового слоя мелкодисперсным заряженным порошком – электрографическим проявителем. Интенсивность оседания порошка на пластине также пропорциональна значению остаточного заряда.

Далее проявленное видимое порошковое изображение переносят на другой носитель (обычно бумагу), который используют для анализа и хранения электрорадиограммы. Электрорадиографическое изображение, как и изображение на пленке, может быть отсканировано, обработано и проанализировано с помощью компьютерных программ.

Преимуществами электрорадиографии перед пленочной радиографией являются:

- большая контрастность, резкость и лучшее отношение сигнал/шум электрорадиограмм;
- получение электрорадиограммы всего за несколько минут;
- отсутствие необходимости в фотолаборатории;
- одна селеновая пластина может использоваться до 1000 раз;
- меньшая стоимость контроля.

Компьютерная радиография на основе запоминающих пластин. В компьютерной радиографии для получения изображения вместо пленки применяются специальные запоминающие пластины многократного пользования [6]. Для запоминания изображений в пластине использован люминофорный слой с фотостимулируемой памятью – сложное химическое соединение. Чаще всего используются соединения типа BaFBr_{x-1-x}:Eu²⁺. На рис. 2 приведена структура запоминающей пластины фирмы «GE Sensing & Inspection Technologies».

Во время экспонирования пластины, размещенной за контролируемым объектом, под дей-

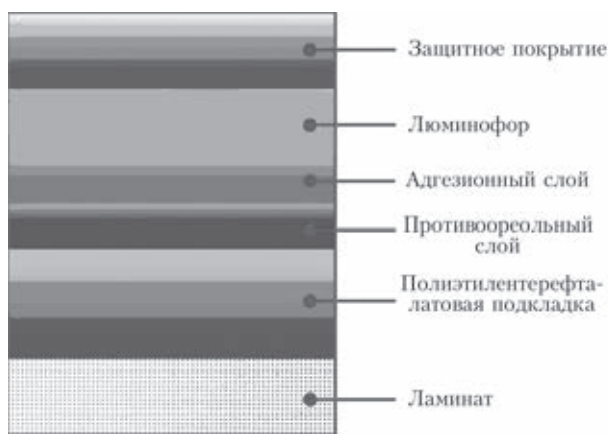


Рис. 2. Структура запоминающей пластины фирмы «GE Sensing & Inspection Technologies»

ствием ионизирующего излучения электроны внутри слоя с фотостимулируемой памятью возбуждаются и захватываются на энергетические уровни (ловушки), на которых могут находиться в течение длительного времени.

После экспонирования пластину вставляют в специальный сканер, в котором она сканируется лазерным пучком [7]. Схема процесса сканирования запоминающей пластины и получения цифрового изображения показана на рис. 3. При сканировании пластины лазерным пучком электроны высвобождаются из ловушек, что сопровождается эмиссией видимого света, длина волны которого отличается от длины волны излучения сканирующего лазера. Этот свет собирается фотоприемником (фотоумножителем) и преобразу-

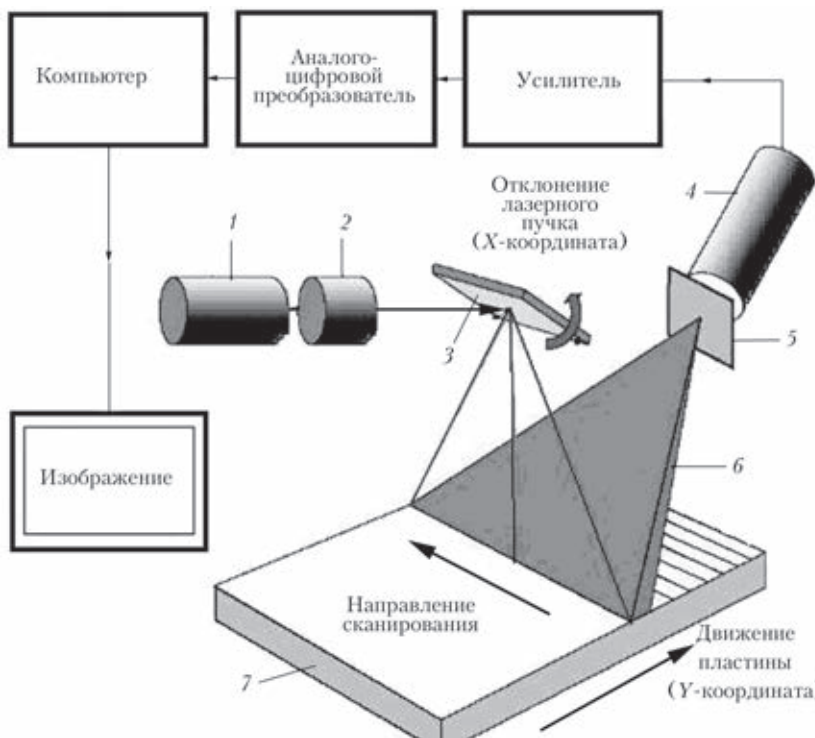


Рис. 3. Схема процесса сканирования запоминающей пластины и получения цифрового изображения: 1 – лазер; 2 – оптическая система формирования пучка; 3 – зеркало; 4 – фотоумножитель; 5 – фильтр; 6 – оптическая система сбора света люминесценции; 7 – запоминающая пластина

ется в электрический сигнал. После его усиления и аналого-цифрового преобразования компьютер формирует на экране монитора цифровое изображение контролируемого объекта.

Поскольку считывание скрытого изображения, сформированного на запоминающей пластине во время ее экспонирования, возможно лишь с использованием компьютерной техники, радиационный контроль с помощью таких систем получил название компьютерной радиографии.

Отличие запоминающих пластин от радиографической пленки – возможность их многократного использования (несколько тысяч раз без потери качества). Пластины совместимы с источниками ионизирующего излучения, имеющих энергию от 10 кэВ до 20 МэВ (рентгеновские аппараты непрерывного действия и импульсные, бетатроны, радиоизотопные источники) [8].

Запоминающие пластины гибкие и подобно пленке могут принимать форму контролируемого объекта. Из процесса компьютерной радиографии исключена химическая обработка пленки, время получения изображения составляет от 1...2 мин. Изображения сохраняются в электронном виде и могут подвергаться цифровой обработке с целью улучшения выявления дефектов.

По динамическому диапазону компьютерная радиография превосходит пленочную, что позволяет выполнять контроль объектов с большим перепадом толщин за одну экспозицию.

Компьютерная радиография обеспечивает относительную чувствительность контроля, соизмеримую с пленочной радиографией, а разрешающую способность – до 20 пар лин./мм. К недостаткам таких систем можно отнести высокую стоимость комплекта оборудования для компьютерной радиографии, а также невозможность выполнять контроль в реальном времени.

Системы реального времени без промежуточных носителей (рис. 1) позволяют выполнять радиационный контроль как неподвижных, так и подвижных объектов в реальном времени. Они подразделяются на системы прямого и прямого преобразования.

В системах прямого преобразования теневое радиационное изображение с помощью сцинтилляционных экранов преобразуется вначале в световое, которое затем преобразуется в электрический сигнал. Далее электрический сигнал используется для

формирования выходного изображения системы НК. В системах прямого преобразования теневого радиационное изображение непосредственно преобразуется в электрический сигнал, который используется для формирования выходного изображения.

Отсутствие промежуточных носителей информации, затратных материалов, дополнительного оборудования и операций, с ними связанных, снижает расходы на радиационный контроль с помощью таких систем и значительно повышает его оперативность.

Рентгенотелевизионные системы на основе рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП). В таких системах преобразователем рентгеновского излучения в видимое является РЭОП, который одновременно выполняет функции усилителя яркости изображений.

Рентгеновский электронно-оптический преобразователь представляет собой электровакуумный прибор с остаточным давлением $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст., схема которого приведена на рис. 4. На входе РЭОП расположен экранно-катодный узел, состоящий из сцинтилляционного экрана 1 и находящегося с ним в оптическом контакте фотокаатода 2. Экран 1 преобразует теневое рентгеновское изображение в видимое. Фотокаатод 2 под действием световых фотонов за счет внешнего фотоэффекта испускает электроны, которые ускоряются и фокусируются электронно-оптической системой РЭОП. Электронно-оптическая система образована электродами 3 – 5, на которые относительно экранно-катодного узла подаются определенные высокие напряжения. Ускоренные и сфокусированные электроны бомбардируют выходной экран 6, изготовленный из мелкозернистого люминофора и расположенного на внутренней стороне выходного окна РЭОП. В результате такой бомбардировки электронами люминофорный экран 6 преобразует электронное изображение в видимое изображение высокой яркости. Преобразование входного рентгеновского изображения в выходное сопровождается уменьшением его размера приблизительно в 10 раз. Таким образом, в РЭОП имеет место тройное преобразование изображения: рентгеновского в видимое, видимого в электронное и электронного вновь в видимое.

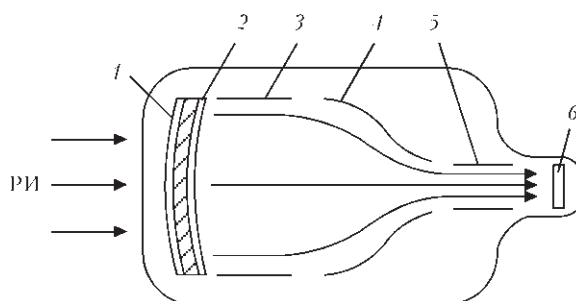


Рис. 4. Рентгеновский электронно-оптический преобразователь: 1 – сцинтилляционный экран; 2 – фотокаатод; 3–5 – электроды электронно-оптической системы; 6 – выходной экран; РИ – рентгеновское излучение

Диаметр рабочего поля различных типов РЭОП составляет от 120 до 400 мм. Диаметр выходного экрана составляет 20, 25, 30 или 35 мм. Входные сцинтилляционные экраны у современных РЭОП изготавливают в основном из иодида цезия CsI. Для улучшения взаимного спектрального соответствия фотокаатода и экрана CsI в качестве активатора в него вводят натрий. Параметры некоторых современных РЭОП приведены в табл. 4 [9–11].

Изображение, сформированное на выходном экране РЭОП, с помощью оптической системы переносят на вход преобразователя свет-сигнал телевизионной камеры. В качестве преобразователей свет-сигнал в современных телевизионных камерах применяются матрицы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), а также КМОП-сенсоры. Электрический видеосигнал с выхода телевизионной камеры подают на телевизионный монитор, на котором воспроизводится рентгенотелевизионное изображение контролируемого объекта, а также в компьютер для обработки, анализа и архивирования изображений.

Рентгенотелевизионные системы на основе РЭОП и телевизионной камеры широко применяются для НК объектов, движущихся со скоростью до 3 м/мин. Относительная чувствительность контроля таких систем составляет 2...3 %, разрешающая способность – 3...5 пар лин./мм.

Недостатками систем на основе РЭОП являются высокая стоимость, большие габариты и масса, относительно небольшой размер рабочего поля, чувствительность к вибрациям и ударам.

Рентгенотелевизионные системы «сцинтилятор-ПЗС». Такие системы имеют ряд преимуществ.

Таблица 4. Параметры современных РЭОП

Параметр	РЭОП		
	Thales TH 9447 QX (16")	Siemens HIDEQ 33-4 ISX (13")	ФИЛИН 16Н2048М (16")
Диаметр входного окна, мм	400	380	406
Эффективный диаметр входного окна, мм	360	330	360
Коэффициент преобразования, (кд/м ²) / (мР/с)	350	418	–
Разрешающая способность, пар лин./мм	4,6	4,0	4,2
Диаметр выходного окна, мм	35	25	35
Масса, кг	36	25...27	43



ществ перед системами на основе РЭОП: возможность смены сцинтилляционного экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры системы; простота конструкции; малые габариты и масса; низкая стоимость и др. Схема рентгенотелевизионной системы «сцинтиллятор–ПЗС» приведена на рис. 5.

Сцинтилляционный экран преобразует тене-вое рентгеновское изображение контролируемого объекта в видимое. Перенос видимого изображения с экрана на ПЗС-матрицу телевизионной камеры происходит с поворотом на 90°, поскольку оптическая система состоит из объектива и зеркала. Для защиты от прямого рентгеновского излучения, которое может приводить к деградации ПЗС-матрицы, телевизионная камера заключена в защитный свинцовый экран.

В качестве сцинтилляционного экрана в таких системах применяют монокристаллические экраны на основе иодида цезия, активированного таллием CsI(Tl), и порошковые экраны на основе оксисульфида гадолиния, активированного тербием Gd₂O₂S(Tb).

Из-за низкой яркости свечения сцинтилляционных экранов в телевизионных камерах таких систем необходимо применять высокочувствительные ПЗС-матрицы [12]. Пригодны, например, ПЗС-матрицы с микролинзами фирмы «Sony» (технология EXview HAD CCD). Для повышения относительной чувствительности контроля и уменьшения шумов на изображении применяют режим длительного накопления изображений на ПЗС-матрице [13]. Перевод ПЗС-матриц в режим длительного накопления изображений, наряду с повышением чувствительности, позволяет использовать для просвечивания объектов малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты [14]. Увеличение возможных длительностей накопления изображений возможно за счет охлаждения ПЗС-матриц с помощью элементов Пельтье.

Относительная чувствительность контроля рентгенотелевизионных систем «сцинтиллятор–ПЗС» соответствует чувствительности пленочной радиографии. Разрешающая способность

таких систем, зависящая от разрешающей способности экрана и ПЗС-матрицы, а также размера рабочего поля, составляет 2...10 пар лин./мм.

Для увеличения размера рабочего поля и разрешающей способности таких систем необходимо применять ПЗС-матрицы больших размеров с большим количеством пикселей, что приводит к увеличению габаритов, массы и стоимости таких систем. Увеличение габаритов и стоимости таких систем обусловлено также сложностью изготовления светосильных объективов для ПЗС-матриц больших размеров.

Для преодоления указанных трудностей было предложено считать изображение со сцинтилляционного экрана несколькими ПЗС-матрицами (от 4 до 88). Каждая ПЗС-матрица (сенсор) формирует частичное (парциальное) изображение. Изображения от каждого отдельного сенсора при обработке сшиваются и формируется результирующее изображение объекта. Такая многосенсорная технология позволила создать относительно недорогие и оптимальные по параметрам рентгеновские детекторы [15]. Конструкция такого многосенсорного рентгеновского детектора, разработанного научно-производственным объединением «Телеоптик» (г. Киев) приведена на рис. 6.

В табл. 5 приведены параметры многосенсорных рентгеновских детекторов НПО «Телеоптик» [16]. Основными преимуществами таких детекторов является большое рабочее поле, которое может составлять 432×432 мм, а также высокая разрешающая способность (до 7 пар лин./мм).

Системы на основе плоскочелюстных детекторов. В последние годы разработаны плоскочелюстные матричные детекторы ионизирующего излучения на основе полупроводниковых структур (см. рис. 1). В детекторах непрямого преобразования (типа «сцинтиллятор–полупроводник») используется промежуточное преобразование ионизирующего излучения в видимое. В детекторах прямого преобразования ионизирующее излучение непосредственно преобразуется в электрический сигнал. Наиболее распространенными в настоящее время являются плоскочелюстные детекторы непрямого преобразования [17].

В качестве плоскочелюстных детекторов «сцинтиллятор–полупроводник» чаще всего используются панели на основе аморфного кремния (a-Si) в комбинации со сцинтиллятором из оксисульфида гадолиния Gd₂O₂S, активированного Tb или Eu, либо из иодида цезия CsI, активированного Tl или Na [18]. Перспективным также является использование в качестве сцинтиллятора оксида гадолиния

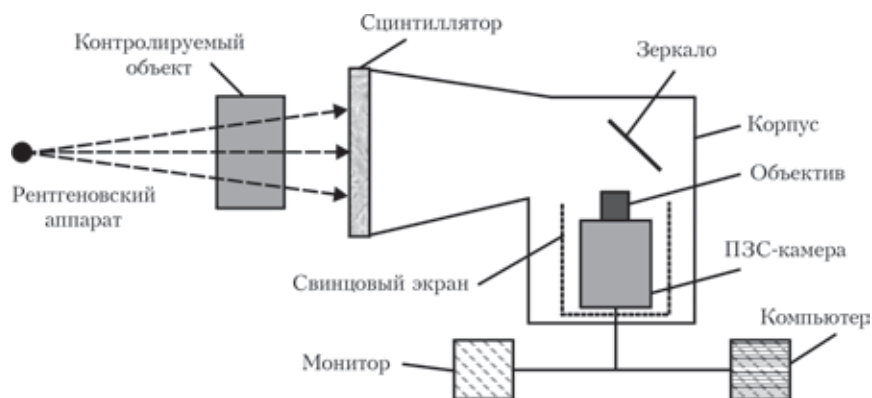


Рис. 5. Схема рентгенотелевизионной системы «сцинтиллятор–ПЗС»



Таблица 5. Параметры многосенсорных рентгеновских детекторов НПО «Телеоптик»

Тип детектора	Рабочее поле, мм	Количество сенсоров	Сцинтиллятор	Разрешающая способность, пар лин./мм	АЦП, бит	Время получения изображения, с
Alpha-R-4000	380x380	48	Gd ₂ O ₂ S(Tb)	4,0	14	<3
IONA-R-01-4000	423x320	45	Gd ₂ O ₂ S(Tb)	4,0	14	<3
IONA-R-4343	432x432	48	CsI	4,6	16	<5
IONA-R-4343-01	428x429	88	Gd ₂ O ₂ S(Tb) (CsI)	4,6	16	<5
Alpha-R-4600	400x400	70	Gd ₂ O ₂ S(Tb)	4,3	14	<4
Alpha-M-7000	255x185	25	Gd ₂ O ₂ S(Tb)	7x7	14	<3

Примечание. АЦП – аналого-цифровой преобразователь

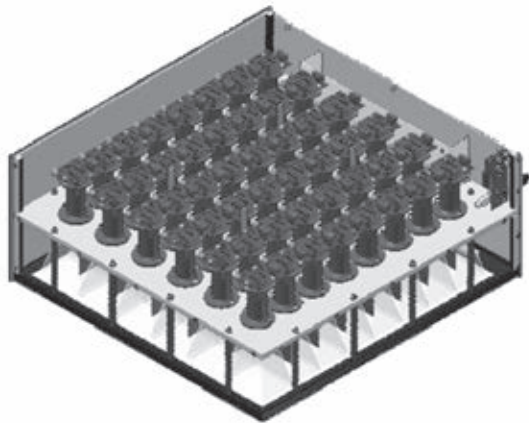


Рис. 6. Конструкция многосенсорного рентгеновского детектора НПО «Телеоптик»

Gd₂O₂S, активированного Eu, который позволяет увеличить пространственную разрешающую способность детектора [19].

Схемы таких плоскочастотных детекторов приведены на рис. 7. Сцинтилляторы преобразуют рентгеновское излучение в видимый свет, который поступает на матрицу фотодиодов из аморфного кремния и конвертируется в электрический заряд. Чувствительность и разрешающая способность детектора с порошковым сцинтиллятором из Gd₂O₂S зависит от толщины и размеров зерна (зернистости) сцинтиллятора. Однако при увеличении его толщины растет рассеяние света и ухудшается разрешающая способность детектора (рис. 7, а).

Для уменьшения рассеяния света в сцинтилляторе и увеличения разрешающей способности детектора применяют сцинтиллятор CsI с монокристаллической игольчатой структурой (рис. 7, б). Монокристаллы CsI игольчатой структуры ориентированы перпендикулярно поверхности сцинтиллятора и направляют свет к фотодиодной матрице как по оптоволокну (т. е. без рассеяния).

Плоскочастотные детекторы непрямого преобразования являются сборками фотодиодов с нанесенным на них сцинтиллятором на активной TFT-матрице (TFT – thin film transistors, или тонкопленочный транзистор). Матрица TFT-транзисторов представляет собой достаточно простую структуру электронных переключателей (типич-

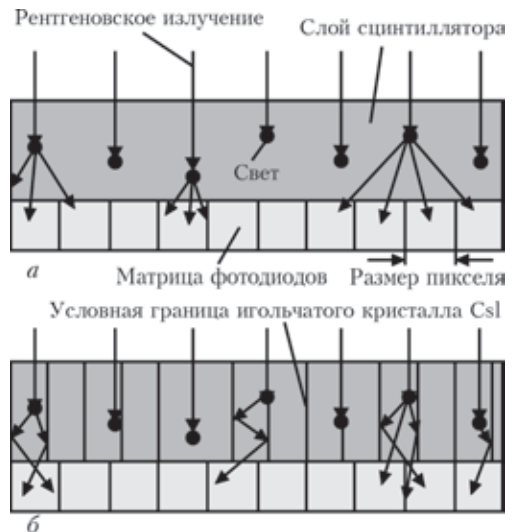


Рис. 7. Схема плоскочастотного детектора непрямого преобразования «сцинтиллятор-полупроводник» на основе аморфного кремния: а – со сцинтиллятором из Gd₂O₂S; б – со сцинтиллятором из CsI

ная схема элемента матрицы TFT-транзисторов показана на рис. 8).

Емкость фотодиода 1 в исходном состоянии заряжена до напряжения U+. При облучении светом она разряжается тем больше, чем больше интенсивность света на фотодиоде. При считывании TFT-транзистор 2 открывается, и емкость снова заряжается через считывающий усилитель до напряжения U+. Величина заряда емкости преобразуется усилителем считывания 3 в напряжение, которое подается на аналого-цифровой преобразователь.

Максимальные размеры плоскочастотных детекторов «сцинтиллятор-полупроводник» составляют 40x40 см, а разрешающая способность – до 10 пар лин./мм, что соответствует размеру пикселя 50 мкм.

Отличительной особенностью аморфного кремния является высокая радиационная стойкость, что позволяет применять такие детекторы при высоких энергиях рентгеновского излучения. Поскольку процесс производства плоскочастотных детекторов на базе аморфных полупроводников и TFT-технологии требует специального технологического оборудования, такие детекторы достаточно дороги.

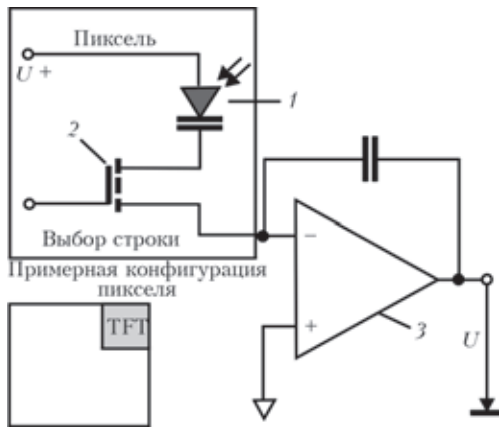


Рис. 8. Схема элемента матрицы TFT-транзисторов: 1 – фотодиод; 2 – тонкопленочный (TFT) транзистор; 3 – считывающий усилитель

В плоскостных детекторах прямого преобразования полупроводниковый слой располагается непосредственно на матрице TFT-транзисторов (рис. 9). В полупроводниковом слое при воздействии рентгеновского излучения внутри полупроводника генерируются электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения возникает электронный ток, который усиливается с помощью считывающей электроники и используется для формирования изображения контролируемого объекта.

Наиболее распространенными вариантами детекторов прямого преобразования являются панели на основе аморфного селена (a-Se) и монокристаллического теллурида кадмия (CdTe). В первом случае матрица тонкопленочных транзисторов (TFT) покрывается слоем аморфного селена, что позволяет преобразовать рентгеновское излучение напрямую в цифровой сигнал без использования сцинтилляторов. Вследствие этого достигается качество изображения, характерного для среднезернистой радиографической пленки. Недостатком детекторов на основе аморфного селена является узкий диапазон рабочих температур. Как при работе, так и при хранении температура детектора должна находиться в диапазоне от 5 до 30 °С для того, чтобы избежать кристаллизации селенового слоя.

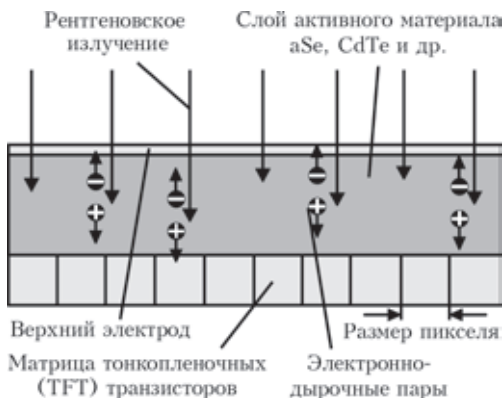


Рис. 9. Схема регистрации рентгеновского излучения плоскостным детектором прямого преобразования

Плоскостные детекторы прямого преобразования на основе CdTe могут работать в более широком температурном диапазоне при энергиях рентгеновского излучения до 300 кэВ, характеризуясь при этом в несколько раз большей чувствительностью. Кроме того, теллурид кадмия CdTe имеет значительный коэффициент экранирования рентгеновского излучения (более 99 % при толщине 1 мм и энергии 120 кэВ), что обеспечивает высокую радиационную стойкость и большой срок службы таких детекторов [20].

В комплекте с плоскостными детекторами обычно поставляется специальное программное обеспечение для их калибровки и коррекции дефектных пикселей.

На рис. 10 показан внешний вид плоскостных детекторов непрямого преобразования на основе CsI (а) и прямого преобразования на CdTe (б) [12].

Фирма «Hamamatsu» (Япония) является производителем высококачественных плоскостных матричных и линейных детекторов ионизирующего излучения непрямого преобразования, а также сцинтилляционных панелей. В табл. 6 приведены основные параметры сцинтилляционных панелей фирмы «Hamamatsu» [21].

На рис. 11 показано два варианта исполнения плоскостных детекторов фирмы «Hamamatsu».

В конструкции рис. 11, а для переноса изображения с экрана на сенсор используется волоконно-оптическая пластина (fiber optic plate – FOP). Такая пластина позволяет минимизировать потери света и сохранить высокую пространственную разрешающую способность при переносе изображения. В конструкции детектора рис. 11, б сцинтилляционный экран располагается непосредственно на сенсоре (ПЗС-матрице).

Параметры ряда плоскостных детекторов фирмы «Hamamatsu» непрямого преобразования со сцинтиллятором CsI приведены в табл. 7 [22]. Разрешающая способность детекторов составляет от 2,5 до 10 пар лин./мм. Максимальную разрешающую способность (10 пар лин./мм) имеют детекторы с размером пикселя 50 мкм. Для детектора с таким размером пикселя (C9732DK-11) на рис. 12 приведена частотно-контрастная характеристика, позволяющая определить глубину модуляции сигнала от штриховой миры на любой пространственной частоте.



Рис. 10. Плоскостные детекторы непрямого преобразования RID 1640 фирмы «Perkin Elmer» со сцинтиллятором CsI (а) и прямого преобразования DIC 100 фирмы «Ajat» на CdTe (б)



Рис. 11. Варианты исполнения плоскопанельных детекторов фирмы «Hamamatsu»: а – конструкция, в которой изображение экрана на сенсор переносится с помощью волоконно-оптической пластины; б – конструкция с непосредственным расположением сцинтилляционного экрана на сенсоре (ПЗС-матрице)

Таблица 6. Характеристики сцинтилляционных панелей CsI (Tl) фирмы «Hamamatsu»

	Тип панели	Габаритные размеры, мм	Эффективная площадь, мм	Толщина подложки, мм	Толщина сцинтиллятора, мкм	Относительный световой выход (% от тип.)	ЧКХ (% от тип.)	Тип
FOS	J6671	30.5×21	27×17	3	150	70	18 (10 пар лин. /мм)	BC
	J6671-01				150	40	33 (10 пар лин. /мм)	BP
	J6673	50×10	47×7	3	150	70	18 (10 пар лин. /мм)	BC
	J6673-01				150	40	33 (10 пар лин. /мм)	BP
	J6675	18×18	15×15	3	150	70	18 (10 пар лин. /мм)	BC
	J6675-01				150	40	33 (10 пар лин. /мм)	BP
	J6677	50×50	47×47	3	150	70	18 (10 пар лин. /мм)	BC
	J6677-01				150	40	33 (10 пар лин. /мм)	BP
	J6679	∅26,5	∅23,5	3	150	70	18 (10 пар лин. /мм)	BC
	J6679-01				150	40	33 (10 пар лин. /мм)	BP
ACS	J8734	50×50	48×48	0,5	150	125	12 (10 пар лин. /мм)	BC
	J8734-01				150	150	25 (10 пар лин. /мм)	BP
	J8977	468×468	440×440	2	600	250	33 (3 пары лин /мм)	BC
ALS	J8978	50×50	48×48	1	150	70	20 (10 пар лин. /мм)	–
	J9857	468×468	440×440	1	600	150	35 (3 пары лин /мм)	–

Примечания. 1. FOS: Fiber Optic Plate with Scintillator (оптоволоконная панель со сцинтиллятором); ACS: Amorphous-Carbon Plate with Scintillator (пластина из аморфного углерода со сцинтиллятором); ALS: Aluminum Plate with Scintillator (алюминиевая пластина со сцинтиллятором). 2. За 100 % принято значения соответствующих параметров экрана Lanex-R. 3. Световой выход и частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) измерялись с помощью ПЗС-матрицы с объективом при напряжении на рентгеновской трубке 60 кВ, использовался алюминиевый фильтр толщиной 1 мм. 4. BC: высокий световой выход; BP: высокая разрешающая способность. 5. ПЗС – прибор с зарядовой связью

Калибровка плоскопанельных детекторов, наряду с коррекцией дефектных пикселей, является одной из важнейших операций. Разработаны специальные методики калибровки и вычитания собственных шумов, позволяющие практически полностью скорректировать изображения и получить максимально достижимые отношения сиг-

нал/шум детекторов. Такая процедура улучшает контрастную чувствительность настолько, что позволяет контролировать изменение 1/1000 радиационной толщины контролируемого материала.

Для коррекции дефектных пикселей используется специальный алгоритм. Этот алгоритм усредняет сигналы от соседних пикселей, используя это



Таблица 7. Основные параметры плоскопанельных детекторов фирмы «Hamamatsu»

Тип детектора	C9252DK-14	C9728DK-10	C9732DK-11	C7943CA-22
Размер активной области	249,6 × 124,8 мм	52,8 × 52,8 мм	120 × 120 мм	124,8 × 124,8 мм
Размер пикселя	200 × 200 мкм	50 × 50 мкм	50 × 50 мкм	100 × 100 мкм
Частота кадров	30 кадров / с	3 кадра / с	1 кадр / с	7 кадров / с
Разрешающая способность	2,5 пар лин./мм	10 пар лин./мм	10 пар лин./мм	5 пар лин./мм
Динамический диапазон	3200	5600	5100	4300
Сцинтиллятор	CsI	CsI	CsI	CsI
АЦП	13 бит	14 бит	14 бит	12 бит

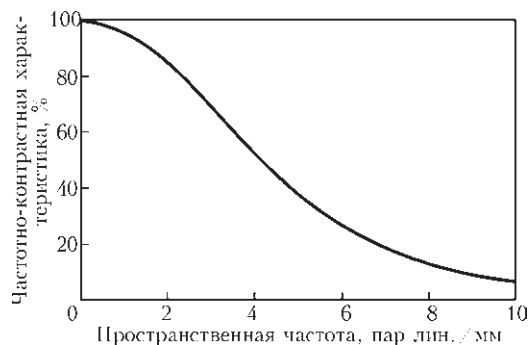


Рис. 12. Частотно-контрастная характеристика плоскопанельного детектора C9732DK-11

среднее значение для дефектных пикселей. Каждый пиксель имеет восемь ближайших соседних пикселей (за исключением тех, которые находятся на краю детектора). Если, по крайней мере, три из них считаются хорошими, тогда возможна операция усреднения их для получения значения дефектного пикселя.

Как показали исследования, плоскопанельные цифровые детекторы позволяют получить существенно более высокое качество изображения, чем пленочная радиография и компьютерная радиография вследствие высокого отношения сигнал/шум, что позволяет снизить предел обнаружения изменения толщины материала до 0,1 % [17].

К недостаткам плоскопанельных цифровых детекторов можно отнести высокую стоимость, критичность к условиям окружающей среды и ограниченную радиационную стойкость.

Системы на основе сканирующих линейных детекторов. Все рассмотренные выше системы не пригодны для контроля крупногабаритных объектов. Контроль таких объектов (багажа, ручной клади, посылок, контейнеров, транспортных средств и т. п.) осуществляется с помощью линейных детекторов, работающих по принципу сканирования [23]. Такие преобразователи представляют собой линейку детекторов либо прямого преобразования (например, типа CdTe, CdZnTe и др.), либо непрямого преобразования рентгеновского излучения (типа сцинтиллятор-кремниевый фотодиод) (рис. 1). В этом случае регистрация рентгеновских квантов происходит за счет их преобразования в сцинтилляторе в видимый свет и последующего детектирования этого света фотодиодом.

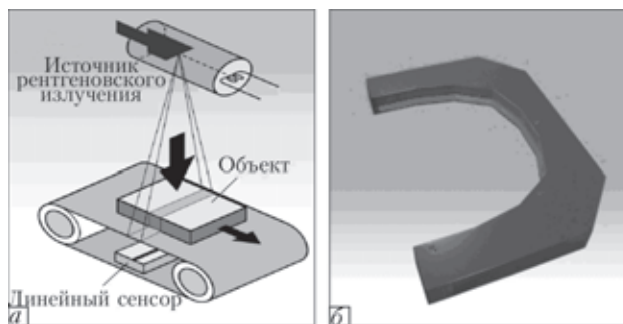


Рис. 13. Схема радиационного контроля линейным детектором на конвейере (а) и внешний вид линейного детектора для контроля качества шин (б)

В таких системах изображение формируется в результате просвечивания узким веерным пучком излучения контролируемого объекта, который движется с постоянной скоростью относительно детектора (рис. 13, а). Размер и пространственная разрешающая способность сканирующей линейки определяются количеством и размером входящих в нее детекторов (каналов). Их может быть 320, 512, 640, 1024, 2048 и больше. Сканирующие системы на основе линейки детекторов имеют ряд преимуществ перед рассмотренными выше системами [24, 25]:

- устраняется влияние неинформативного рассеянного излучения на качество цифрового изображения;
- линейки детекторов могут иметь длину в несколько метров, что позволяет сканировать объекты больших размеров, а размер отдельного детектора до 50 мкм;
- широкий динамический диапазон (больше 7000);
- возможность изготовления линеек, повторяющих специфические формы объекта, например, автомобильных шин (рис. 13, б).

В табл. 8 приведены основные параметры линейных детекторов непрямого преобразования фирмы «Hamamatsu» [26].

На рис. 13 приведена схема радиационного контроля объектов, движущихся на конвейере, с помощью линейного детектора. Объект перемещается с постоянной скоростью относительно источника рентгеновского излучения и линейного детектора, в результате чего объект сканируется узким веерным пучком рентгеновского излучения. Рентгеновское изображение объекта при этом по-



Таблица 8. Параметры различных линейных детекторов фирмы «Hamamatsu»

Параметр	C9750-05FCN	C9750-10FCN	C9750-10TCN	C9750-20TCN
Рекомендованный рабочий энергетический диапазон, кВ	25...160			
Размер пикселя, мм	0,4		0,2	
Рабочая ширина, мм (пикселей)	256 (640)	512 (1280)	256 (1280)	512 (2560)
Разрешающая способность	1/640	1/1280	1/1280	1/2560
Скорость сканирования, м/мин	4...100		2...50	
Разрядность АЦП, бит	12			
Функции коррекции	Аналоговая: коррекция темного кадра. Цифровая: коррекция темного кадра, коррекция чувствительности			
Рабочий диапазон температур, °С	0...40			
Напряжения питания, В	+5 В, +15 В			
<i>Примечание.</i> Метод регистрации – сцинтилляционный				

строчно регистрируется линейным детектором, оцифровывается и передается в компьютер. За счет значительного уменьшения попадающего на детектор рассеянного излучения такие системы позволяют получать рентгеновские изображения высокого качества при малых дозах излучения.

Выводы

Радиационные системы НК с промежуточными носителями информации (пленочная радиография, электрорадиография, компьютерная радиография) широко применяются в промышленности и обеспечивают высокие относительную чувствительность контроля. Однако такие системы имеют существенные недостатки: невозможность проводить контроль объектов в реальном времени, низкая производительность и высокая стоимость.

Более перспективными являются радиационные системы прямого преобразования на основе полупроводниковых плоскостных детекторов. Такие системы в реальном времени обеспечивают относительную чувствительность контроля и разрешающую способность, соизмеримые и превосходящие пленочную радиографию.

Наиболее перспективными являются плоскостные детекторы и на их основе рентгеновско-телевизионные системы «сцинтиллятор–ПЗС-матрица». Такие системы, имея низкую стоимость, обеспечивают относительную чувствительность контроля и разрешающую способность, соизмеримые с пленочной радиографией, и позволяют проводить контроль объектов в реальном времени при низкой стоимости оборудования. Причем такой контроль осуществляется с использованием оборудования, применяемого у Заказчика при пленочной радиографии. Обнаруженные дефектные зоны по желанию заказчика воспроизводятся на пленку.

1. *Тенденции развития технологий и средств радиационной дефектоскопии* / Н. Р. Кузелев, В. М. Юмашев, Д. И. Антонов и др. // Контроль. Диагностика – 2013. – № 2. – С. 47–55.

2. *Троицкий В. А.* Флэш-радиография // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–50.

3. *Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов* / Е.Ю. Усачев, В.В. Валиков, Е.Г. Точинский и др. // Контроль. Диагностика – 2014. – № 6. – С. 60–64.

4. *Средства и техника рентгенографии.* Рентгеновские пленки // www.spectroflash.ru/info/articles/287/facilities_x-ray_films.

5. *Lee D. L., Cheung L. K., Jeromin L. S.* Imaging performance of a direct digital radiographic detector using selenium and a thin-film-transistor array // Proc. of the International Symposium: CAR'96 / Ed. by Lemke H.U. – Amsterdam: Elsevier, 1996. – P. 41–46.

6. *Schaefer-Prokop C. M., Prokop M.* Storage phosphor radiography // Eur. Radiol. – 1997. – № 7, Suppl. 3. – P. 58–65.

7. *Майоров А. А.* Компьютерная радиография с использованием флуоресцентных запоминающих пластин – что это такое? // В мире неразруш. контроля. – 2004. – № 3 (25). – С. 42–43.

8. *Мозильнер Л. Ю., Маркина Е. Н.* Опыт применения технологии цифровой радиографии в практике строительства и эксплуатации трубопроводов // Там же. – 2009. – № 2 (44). – С. 42–46.

9. *Thales TH 9447 QX (16»)* datasheet // www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/th9447qx_1.pdf.

10. *Siemens HIDEQ 33-4 ISX (13»)* datasheet // w9.siemens.com/cms/oemproducts/Home/Products/Documents/ds_HIDEQ_33-4_ISX_eng_2012-02.pdf.

11. *РЭОП ФИЛИН 16H2048M* // www.tehastor.ru/index.php?page=filin.

12. *Относительная чувствительность рентгеновско-телевизионных систем на основе высокочувствительных ПЗС-камер и рентгеновских монокристаллических экранов* / Н.Г. Белый, С.В. Денбовецкий, А.В. Лещинин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2007. – № 2. – С. 34–40.

13. *Высокочувствительные рентгеновско-телевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений* / В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский и др. // Там же. – 2009. – № 3. – С. 41–46.

14. *Относительная чувствительность рентгеновско-телевизионных систем на основе импульсных рентгеновских аппаратов* / Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский, С. Р. Михайлов и др. // Там же. – 2013. – № 1. – С. 39–44.

15. *Мирошниченко С. И., Невгасимый А. А.* Многосенсорные цифровые рентгеновские приемники // Наука та інновації. – 2014. – № 2 (Т. 10) – С. 40–48.

16. *Цифровые приемники «Альфа» и «Иона»* // www.teleoptic-pra.com.ua/ru/produktiyi/czif-rovyie-priemniki-alfa.html

17. *Майоров А. А.* Цифровые технологии в радиационном контроле // В мире неразруш. контроля. – 2009. – № 3 (45). – С. 5–12.

18. *Nikl M.* Scintillation detectors for X-rays // Meas. Sci. Technol. – 2006. – 17, № 4. – P. 37–54.



19. Chang-Woo Seo, Bo Kyung Cha, Sungchae Jeon. Characterization of indirect X-ray imaging detector based on nanocrystalline gadolinium oxide scintillators for high-resolution imaging application // Nucl. Instrum. Meth. A. – 2013. – Vol. 699. – P. 129–133.
20. Литвинов А. Высокое качество изображения. Последнее поколение детекторов рентгеновского излучения «SID-A50» // Технологии в электронной промышленности. – 2011. – № 6. – С. 10–13.
21. Scintillator Plates // www.hamamatsu.com/jp/en/3010.html.
22. X-ray Flat Panel Sensors // www.hamamatsu.com/jp/en/4011.html.
23. Gingold E., Lee D. Development of a Novel High-Resolution Direct Conversion X-ray Detector // Proc. SPIE. – 2000. – № 3977. – P. 185–193.
24. Недавний О. И., Удод В. А. Современное состояние систем цифровой рентгенографии // Дефектоскопия. – 2001. – № 8. – С. 62–82.
25. Оптимизация параметров многоканальных непрерывно сканирующих систем цифровой рентгенографии / В. А. Удод, М. Б. Лебедев, В. А. Клименов и др. // Там же. – 2011. – № 2. – С. 55–62.
26. X-ray Line Scan Camera C9750 // www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SFAS0017E_C9750s.pdf.

The review is devoted to the most widely applied modern systems of radiation nondestructive testing. A classification of radiation nondestructive testing systems is proposed. Traditional systems with intermediate information carriers (film radiography, electroradiography, computer radiography), and promising digital real time systems without intermediate information carriers are considered.

Keywords: nondestructive testing, flash-radiography, digital radiography, X-ray TV system, X-ray electron-optical image intensifier, scintillation screen, CCD-matrix, flat-panel detector

Поступила в редакцию
02.02.2015



РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАНУ В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Обследование состояния качества изделий и сооружений радиационными, акустическими, электромагнитными, оптическими, тепловизионными и другими физическими методами

Металлические, полиэтиленовые, композитные, керамические изделия, здания и сооружения (мосты, трубопроводы, котлы, подвижной состав, подъемное и шахтное оборудование) должны периодически обследоваться различными физическими методами на наличие дефектов, старения, износа, трещин усталости, коррозионных поражений и т.п. Для этих целей используется соответствующее оборудование и оригинальные технологии на основе радиационных, акустических, магнитных и других физических полей. При этом измеряют размеры и расположение внутренних дефектов. Эта информация ложится в основу последующих прочностных расчетов, определения остаточного ресурса и рекомендаций по допустимости эксплуатации объекта.

Комплекс диагностических услуг включает:

- визуально-оптические, радиографические, ультразвуковые, магнитные, вихретоковые, капиллярные, тепловые и другие методы неразрушающего контроля;
- рекомендации по проведению ремонтных работ на основе дефектоскопии;
- консультирование, подготовку, аттестацию и сертификацию персонала в соответствии с международным стандартом ISO 9712;
- оказание помощи в поставке оборудования и организации подразделений неразрушающего контроля;
- оценку свойств и напряженно-деформированного состояния металлоконструкций.

На фото показаны объекты, которые не могут быть приняты в эксплуатацию без проведения контроля качества их сварных соединений физическими методами.



ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ МАКРОРУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

О. М. СТАНКЕВИЧ

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів. E-mail: stan_olena@yahoo.com

Розглянуто особливості сигналів акустичної емісії під час макроруйнування різних конструкційних матеріалів (корунду, скла, сталі, стоматологічних полімерів, композитів). Для цього використано результати аналізу локальних максимумів неперервного вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії. За критерієм ідентифікування типів макроруйнування оцінено крихке, в'язко-крихке та в'язке руйнування. Встановлено характерні відмінності сигналів за шириною смуги частот їх локальних максимумів, тривалістю її випромінювання та зміною значень домінуючої частоти. Бібліогр. 34, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: руйнування, акустична емісія, неперервне вейвлет-перетворення, критерій ідентифікування типів руйнування

Одним із факторів, які визначають тривалість експлуатування того чи іншого елемента конструкції або виробу, є ступінь деградування їх конструкційних матеріалів. На основі моніторингу стану останніх методами та засобами неруйнівного контролю можна виявити зародження та розвиток у них небезпечних явищ на ранніх стадіях і відповідним чином запобігати розвитку незворотних руйнівних процесів. Особливої уваги потребують тріщиноподібні дефекти, оскільки окрихчення матеріалів сприяє значному зростанню швидкості руйнування як на стадіях зародження, так і субкритичного розвитку. У зв'язку з цим важливо вміти оцінювати типи руйнування матеріалів, що може дати важливу інформацію про стадії його розвитку, а відтак і ефективно оцінити залишковий ресурс об'єкта контролю.

Стан проблеми. Серед великої кількості методів неруйнівного контролю широкою популярності набув метод, заснований на використанні явища акустичної емісії (АЕ), яка супроводжує руйнування матеріалу [1]. Він ґрунтується на ефективному реєструванні пружних хвиль АЕ як носія інформації про стан досліджуваних об'єктів із подальшим аналізом та опрацюванням зареєстрованих електричних АЕ-сигналів. Сучасні засоби відбору, опрацювання і зберігання АЕ-інформації дають можливість оцінити такі параметри сигналів як амплітуда, частота, час наростання переднього фронту, тривалість, енергія тощо. За їх зміною можна, зокрема, й ідентифікувати тип руйнування.

Динаміку елементарних процесів мікротріщиноутворення та можливість кількісного оцінювання руйнування за сигналами АЕ досліджували у

праці [2]. Доведено, що вибухова АЕ, яка супроводжує ріст макроскопічних субкритичних тріщин, зумовлена миттєво швидким руйнуванням у мікроскопічному об'ємі.

Методику ідентифікування типів макроруйнування за амплітудно-частотними характеристиками сигналів АЕ вперше представлено авторами [3]. Встановлено, що під час пластичного деформування випромінюються неперервні сигнали АЕ з власною частотою коливань приблизно 20 кГц. У зоні плинності матеріалу руйнування супроводжується дискретними сигналами АЕ із частотою коливань близько 50 кГц, а за крихкого руйнування – у діапазоні до 250 кГц. На думку авторів АЕ добре відображає процеси, які корелюють із механічними параметрами росту тріщини, зокрема, зі швидкістю поширення та динамічними змінами в області її вершини.

Взаємозв'язок між енергією АЕ та механізмами пластичної деформації і руйнування досліджували автори роботи [4]. Визначено числові значення енергії для сигналів, що відповідають різним типам руйнування: процеси пластичної деформації характеризуються виділенням енергії порядку $10^{-11} \dots 10^{-7}$ Дж, а процес руйнування супроводжується великою кількістю імпульсів з енергією порядку $10^{-6} \dots 10^{-1}$ Дж.

Більшість відомих критеріїв ідентифікування типів макроруйнування побудовано на особливостях частотних спектрів відповідних сигналів АЕ [5–12]. Так, на основі частотного аналізу сигналів АЕ, які генерувались під час руйнування сталі НФ-1 та латуні 70-30, автори роботи [7] припустили, що зміна частотного спектра сигналів може бути пов'язана зі зміною механізмів деформації.



Для розпізнавання сигналів АЕ від некритичних джерел (зародження пор за пластичної деформації поблизу тріщини) та підростаючої тріщини автори [8] провели аналіз частотних спектрів акустичного випромінювання. Для сталі AISI-4340 частотний пік сигналів АЕ спостерігали у діапазоні більше 200 кГц. Припустили, що такі сигнали відповідають розвитку тріщини. Для в'язкої сталі SA 533В на початкових стадіях розвитку дефекту сигнали мали значні амплітуди у високо-частотній області. За подальшого навантаження відбувалось поступове зміщення форми спектра. Наприкінці руйнування з'являються сигнали з перевагою низькочастотної складової. Автори висунули гіпотезу, що такі зміни у спектрі викликані сигналами від інших джерел, а саме від зародження внаслідок пластичного деформування.

Вивчаючи особливості деформування кремністого заліза, дослідники на основі частотного аналізу виділили такі стадії деформування: виникнення сигналів АЕ з малою амплітудою і частотою свідчить про ранні стадії навантаження, ковзання; поява високочастотних гармонік відповідає передруйнуванню, масовій пластичній течії матеріалу; наступне зникнення високих частот пов'язано з розвитком макроруйнування [9].

За критерій ідентифікування стадій докритичного росту тріщини запропоновано використовувати звуження смуги частот сигналів АЕ [10, 11], а для оцінки типів макроруйнування під час її підростання – критерій на основі найстійкіших параметрів сигналів (амплітуда, смуга спектра частот) із урахуванням режимів відбору АЕ-інформації [1].

Дослідження спектральних особливостей сигналів АЕ зазвичай здійснюють на основі перетворення Фур'є їх амплітудно-часових залежностей. Водночас для розв'язування багатьох практичних та теоретичних задач аналізу сигналів АЕ успішно використовують їх вейвлет-перетворення (ВП). Важливою перевагою ВП перед традиційним перетворенням Фур'є є можливість не лише виділяти частотні компоненти сигналу, але й локалізувати їх у часі, забезпечуючи одночасну роздільну здатність як за частотою (для локалізації низькочастотних складових), так і за часом (для виділення компонент високої частоти) [12].

ВП сигналів АЕ застосовували для дослідження різних матеріалів (сталей, сплавів тощо) у задачах виявлення та класифікації неоднорідностей [13], дефектів [14, 15] та особливостей мікроруйнування [16, 17]. Ефективним виявився метод ВП для ідентифікування механізмів руйнування композитних матеріалів різної структури та з різноманітними матрицями [18, 19].

Відомо, що для локації джерел АЕ використовують метод триангуляції, у якому за різницею часу приходу пружної хвилі на первинні перетво-

рувачі визначають координати її джерела. Вейвлет-фільтрація сигналів АЕ дає можливість ефективно видаляти шумові компоненти сигналу, що, своєю чергою, сприяє зменшенню впливу шумів та завад на визначення часу приходу сигналу, а відтак, і підвищенню точності локалізації джерел АЕ [20, 21]. Розроблено низку методик прогнозування зміни механічних характеристик промислового обладнання у процесі експлуатування за параметрами ВП сигналів АЕ [22, 23].

Вивчаючи АЕ під час руйнування конструкційних матеріалів, важливо вміти розмежувати походження сигналів АЕ та виділити їх відповідність тим чи іншим механізмам, що відбуваються на різних стадіях руйнування. Аналіз локальних особливостей неперервного вейвлет-перетворення (НВП) сигналів АЕ дає змогу ідентифікувати тип руйнування, яке відбувається у певний момент часу в конструкційному матеріалі.

Мета дослідження – на основі аналізу локальних особливостей неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ створити методику оцінювання типів макроруйнування різних конструкційних матеріалів.

Розроблення критерію ідентифікування типів руйнування за параметрами вейвлет-перетворення сигналів АЕ. Неперервне вейвлет-перетворення (НВП) використовують для дослідження структурних особливостей сигналів [12]. За означенням НВП – це скалярний добуток вихідного сигналу $s(t) \in L^2(R)$ та базисних функцій

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ так що}$$

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

Базисні функції $\psi_{ab}(t)$ називають вейвлетами. Їх можна розглядати як масштабування та зсув деякої функції-прототипу $\psi(t)$. За рахунок зміни масштабу a , збільшення якого призводить до звуження Фур'є-спектра функції $\psi_{ab}(t)$, вейвети здатні виявляти відмінності в характеристиках на різних шкалах (частотах), а за рахунок зсуву b – проаналізувати властивості сигналу в різних точках на всьому інтервалі, який досліджується.

У програмному середовищі AGU-Vallen Wavelet, розробленому компанією «Vallen Systeme», для НВП сигналів АЕ за функцію-прототип вибрано 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 $\gamma = \pi(2 \ln 2)^{1/2} = 5,336$ [24].

Особливості структури сигналу виявляють за великими значеннями коефіцієнтів вейвлет-роз-



кладу. Встановивши ділянку часу, якій відповідає такий коефіцієнт, можна її детально проаналізувати, визначити тривалість і частотний склад.

На основі теоретичних [25, 26] та експериментальних [27, 28] досліджень побудовано критерій ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів за амплітудно-частотними характеристиками локальних особливостей НВП сигналів АЕ. Для цього використано критеріальний параметр κ , значення якого визначають за співвідношенням

$$\kappa = \frac{WT_{\max} \Delta f_0}{\Delta f_{\max}}, \quad (1)$$

де WT_{\max} – максимальне значення вейвлет-коефіцієнта $WT = WT(a, b)$ локальної події в сигналі АЕ; Δf_{\max} – ширина частотної смуги в проекції НВП на площину « $WT - f$ » для центральної частоти f_{\max} , яка визначається за рівнем $0,7WT_{\max}$; Δf_0 – ширина робочої смуги вимірювального АЕ-тракту, яка визначається робочою смугою частот первинного перетворювача. За експериментально встановленими значеннями критеріального параметра тип макроруйнування конструкційних матеріалів розділено на в'язке ($\kappa < 0,1$), в'язко-крихке ($0,1 \leq \kappa < 0,2$) і крихке ($\kappa \geq 0,2$).

Таким чином, у конструкційних матеріалах під час руйнування джерелами АЕ у короткому інтервалі часу можуть бути різні процеси: формування пластичних деформацій, мікротріщиноутворення, розтріскування включень, макроруйнування тощо, що зумовлює вказані типи руйнування. Для їх ідентифікування за сигналами АЕ з використанням критеріального параметра (1) необхідно побудувати НВП сигналу АЕ та визначити максимальне значення вейвлет-коефіцієнта WT_{\max} локальної події; побудувати проекцію НВП на площину « $WT - f$ » у момент досягнення значення WT_{\max} ; визначити ширину смуги частот Δf_{\max} , за рівнем $0,7WT_{\max}$; обчислити критеріальний показник κ за співвідношенням (1) та за його значенням ідентифікувати тип руйнування, що відбувається у фіксований момент часу в матеріалі.

Результати досліджень та їх обґрунтування. Досліджували руйнування різних матеріалів (корунду, скла, сталі, стоматологічних полімерів, композитів). Під час випробувань паралельно проводили відбір АЕ-інформації за допомогою акустико-емісійної вимірювальної системи SKOP-8M [1]. 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 вимірювального АЕ-тракту була 0,2...0,6 МГц, що узгоджується

з відповідними значеннями у згаданому вище критерії ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів за співвідношенням (1). Відносна похибка реєстрації амплітуди сигналів АЕ не більше $\pm 10\%$.

Особливості руйнування крихких матеріалів. За схемою триточкового згину досліджували циліндричні зразки з корунду (діаметр 13,5 мм, довжина $l = 80$ мм). Вже приблизно через 95 с після початку експерименту система реєструвала сигнали АЕ з максимальними амплітудами у межах 150...250 мкВ. Хвильове відображення та НВП однієї з таких вибірок показано на рис. 1, а, б відповідно. Бачимо, що на початкових стадіях руйнування за короткий проміжок часу (70 мкс) відбуваються інтенсивні зміни у структурі матеріалу, про що свідчить велика кількість локальних максимумів вейвлет-коефіцієнтів НВП. За співвідношенням (1) обчислили значення критеріального параметра для локальних максимумів 1–5 на рис. 1, б: $\kappa_1 = 0,07$; $\kappa_2 = 0,075$; $\kappa_3 = 0,02$; $\kappa_4 = 0,02$; $\kappa_5 = 0,19$. Згідно зазначеного вище критерію ідентифікування типів руйнування локальні максимуми 1, 2, 4 характеризують в'язке руйнування, а 3, 5 – крихке. На основі принципів лінійної механіки руйнування можемо зауважити, що навіть у крихких матеріалах на початкових стадіях руйнування відбувається накопичення пошкодження в мікрооб'ємах суцільного матеріалу (локальні максимуми 1, 2, 4), яке призводить до утворення мікротріщин (локальні максимуми 3, 5). За подальшого росту навантаження окрім зазначених стадій відбувається об'єднання чи злиття мікротріщин у макротріщини та ріст останніх, що врешті призводить до поділу твердого тіла на частини. Це підтверджується зростанням у цей час амплітуд сигналів АЕ та значення критеріального показника κ .

Опрацьовано 50 вибірок. Значення критеріального параметра склали діапазон $0,02 \leq \kappa \leq 0,55$. Їх НВП характеризується чергуванням широкосмугових частотних піків з невеликими значеннями вейвлет-коефіцієнтів WT_{\max} (рис. 1, в) і малою тривалістю випромінювання (рис. 1, з) та вузькосмугових – з більшими значеннями WT_{\max} (рис. 1, д) та значною тривалістю випромінювання (рис. 1, е). Зауважимо також, що домінуюча частота f_{\max} локальних максимумів, які характеризують в'язке руйнування, більша (рис. 1, в), ніж у випадку крихкого руйнування (рис. 1, д). Тобто в'язкі механізми відбуваються з випромінюванням пружних хвиль вищих частот, ніж крихкі.

Із наближенням до критичного навантаження кількість широкосмугових частотних піків суттєво зменшується, а переважають локальні максимуми, що характеризують крихке руйнування. Аналогічні результати отримали раніше, досліджуючи руйнування різних марок скла [27].

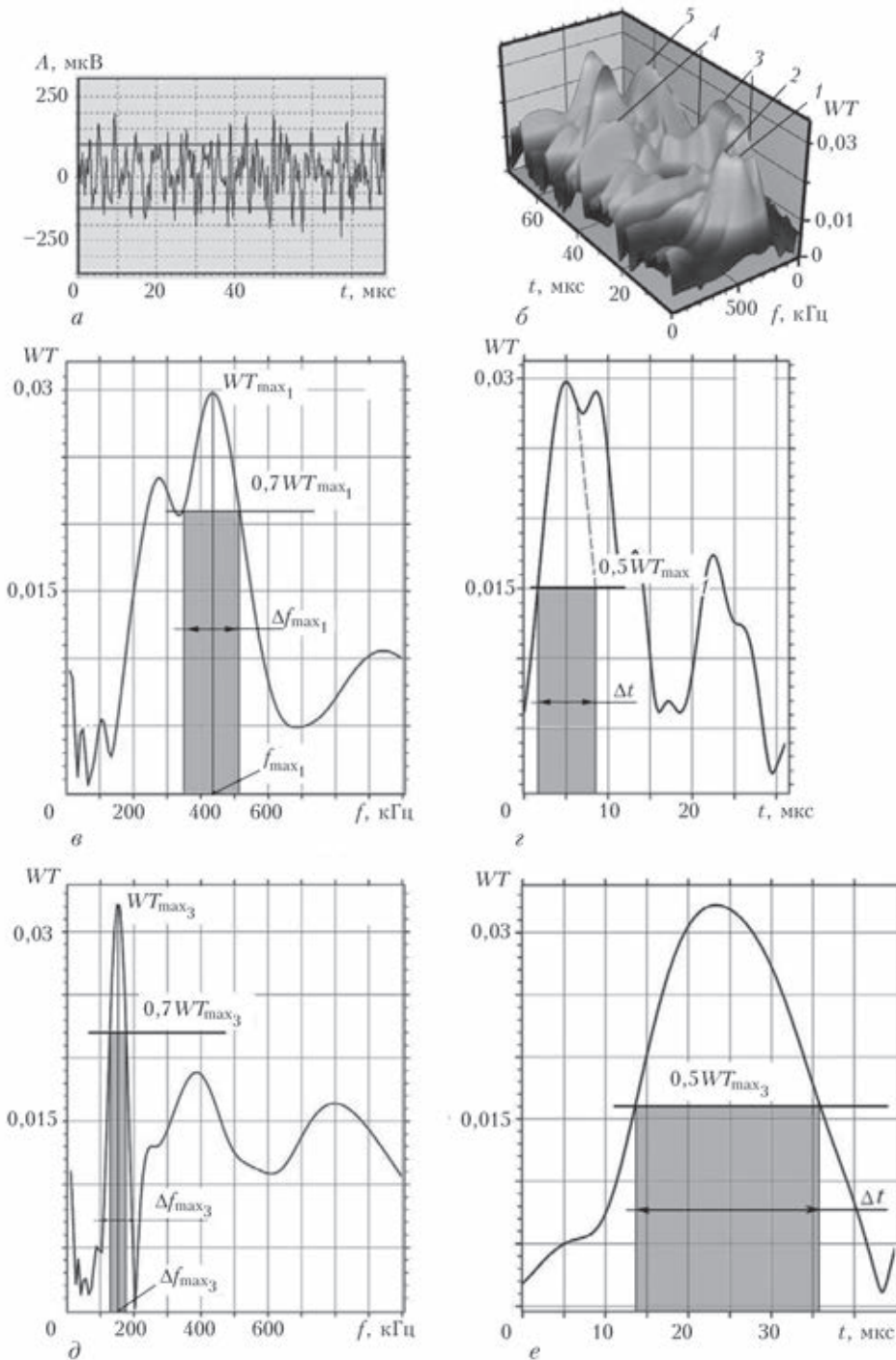


Рис. 1. Хвильове відображення сигналу АЕ (а) та його НВП (б) на початкових стадіях руйнування корунду. Типові проєкції НВП на площини « $WT-f$ » та « $WT-t$ » у момент досягнення максимального значення вейвлет-коефіцієнта WT_{max} для в'язкого (в, з) та крихкого (д, е) руйнування

Руйнування сталей. Руйнування циліндричних зразків зі сталі 3сп (діаметр 4 мм, $l = 40$ мм) досліджували під час квазістатичного розтягу зі швидкістю переміщення затискачів $4 \cdot 10^{-7}$ м/с. У режимі постобробки будували діаграми розтягу і розподілу амплітуд (рис. 2), НВП зареєстрованих сигналів АЕ та визначали параметри його локальних особливостей.

Побудована діаграма розтягу підтверджує, що даний конструкційний матеріал є яскравим представником в'язких матеріалів [1]. Для оцінки типів

руйнування, які протікають у ньому, будували неперервне ВП для сигналів АЕ. Для порівняння параметрів локальних особливостей НВП сигналів АЕ проаналізували результати опрацювання сигналів, отриманих на різних стадіях руйнування (рис. 2): *A* – за початкового навантаження; *B* – на ділянці пластичності (під час звуження зразка); *C* – за досягнення критичного значення навантаження.

Оскільки значення критеріального параметра k за початкового навантаження належать діапазону $0,03 \leq k \leq 0,11$, то можна припустити, що у

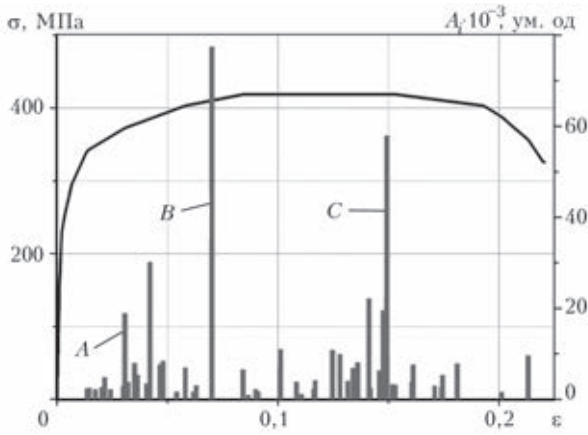


Рис. 2. Діаграма розтягу та розподіл амплітуд сигналів АЕ для сталі 3сп

цей час переважають механізми в'язкого руйнування, тобто у матеріалі відбувається накопичення рухомих дислокацій (пластична деформація) перед перешкодами (граніцями зерен, міжфазними граніцями, можливими включеннями тощо). Для локальних максимумів цих сигналів характерним є невеликі значення максимальних вейвлет-коефіцієнтів $0,03 \leq WT_{\max} \leq 0,06$ та порівняно значна ширина частотної смуги в проекції « $WT - f$ » $0,1 \leq \Delta f_{\max} \leq 0,17$. За подальшого розтягу з'являються сигнали АЕ, для локальних максимумів яких значення критеріального параме-

тра є дещо більшими: $0,1 \leq \kappa \leq 0,18$. Це може бути підтвердженням розвитку процесу мікротріщиноутворення, який чергується з процесом розвитку пластичних деформацій, адже за зміною значення показника κ спостерігаємо чергування сигналів двох типів. За досягнення навантаження $\sigma = 403$ МПа з'являються сигнали АЕ, які гіпотетично генеруються внаслідок стрімкого злиття мікротріщин або стрибкоподібного підростання макротріщини, оскільки для їх локальних максимумів значення критеріального параметра становлять $0,3 \leq \kappa \leq 0,6$. Чергування сигналів двох типів спостерігаємо впродовж подальшого розтягу аж до руйнування зразка, що підтверджує тезу про те, що на кожному етапі просування тріщини присутні як в'язкі, так і крихкі механізми руйнування.

На рис. 3 зображено НВП характерних сигналів АЕ, які відповідають в'язкому (рис. 3, а) та крихкому (рис. 3, б) руйнуванню сталі 3сп. Аналогічно до випадку руйнування крихких матеріалів (рис. 1) видно, що для НВП сигналів АЕ за в'язкого руйнування характерною ознакою є широка смуга частот у проекції локального максимуму на площину « $WT - f$ » та невелика тривалість випромінювання за проекцією на площину « $WT - t$ », а за крихкого руйнування – відбувається

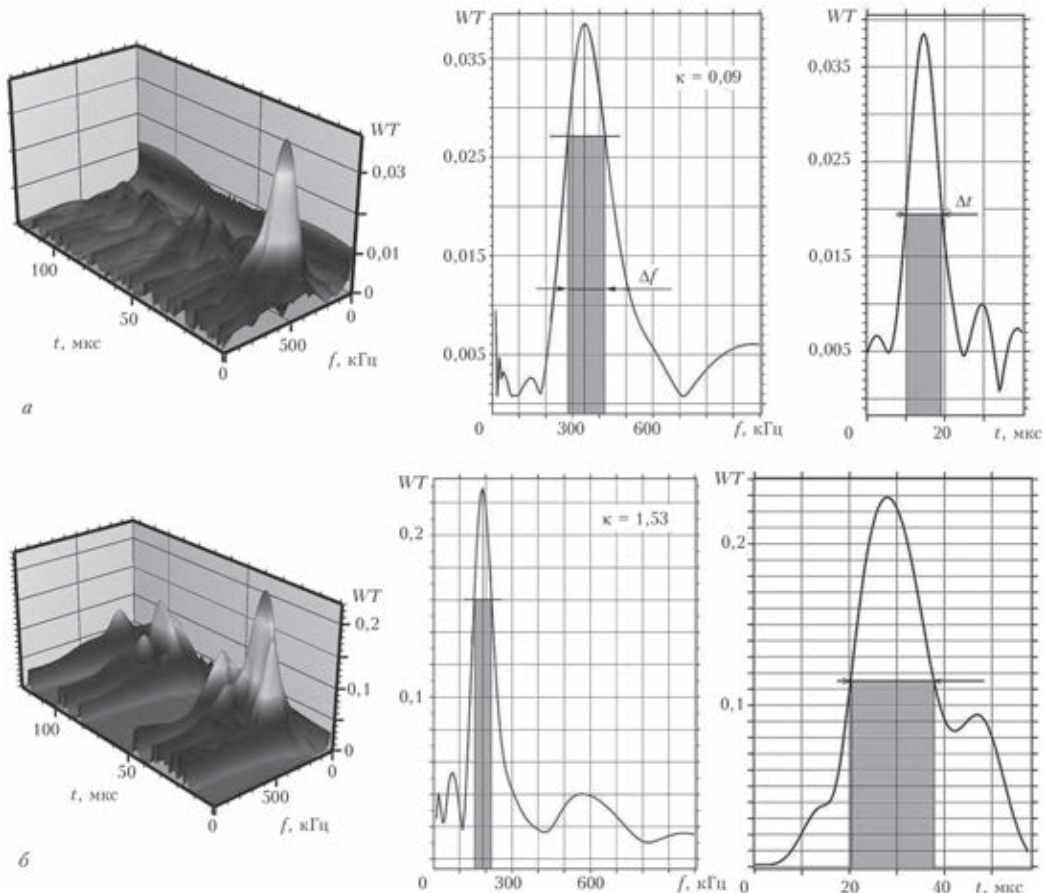


Рис. 3. НВП сигналів АЕ за в'язкого (а) та крихкого (б) руйнування сталі 3сп (3D-зображення; проекція на площини « $WT - f$ » та « $WT - t$ » у момент досягнення WT_{\max} відповідно)

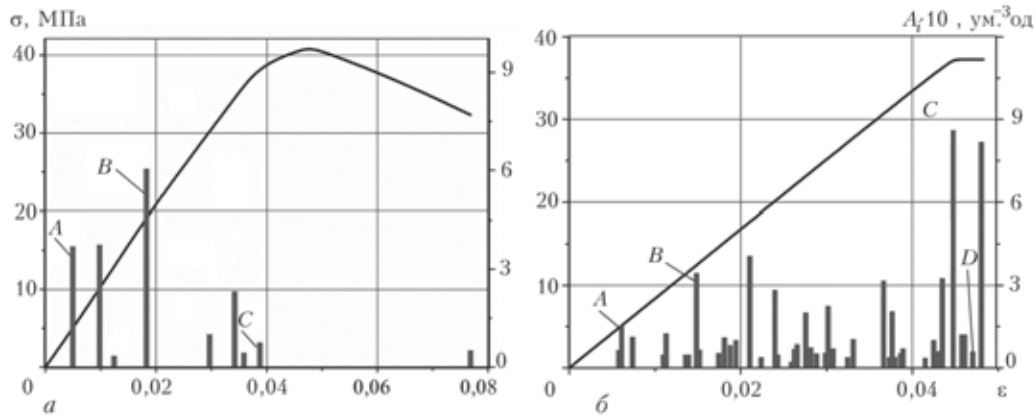


Рис. 4. Діаграми розтягу та розподіл амплітуд сигналів АЕ для зразків з полімерних матеріалів: а – Protemp; б – Acrodent

звуження відповідної частотної смуги, збільшення часу її випромінювання та зміщення у сторону нижчих частот домінуючої частоти.

Отримані результати корелюють з аналогічними дослідженнями інших конструкційних сталей [28, 29]. На відміну від випадку руйнування корунду під час розтягу сталі 3сп переважають сигнали АЕ, які за критерієм ідентифікування типів руйнування характеризують в'язкий тип, що підтверджує його класифікацію як в'язкого матеріалу.

Отже, на основі дослідження руйнування різних типів конструкційних матеріалів (крихких та в'язких) підтверджено стабільність розвитку цього процесу незалежно від їх структури, а параметри сигналів АЕ, пов'язані з локальною перебудовою структури матеріалів, корелюють з параметрами кінетики розвитку дефектів та руйнування матеріалу.

Оцінювання типів руйнування полімерів. Досліджували руйнування під час квазістатичного розтягу полімерних пластинчатих зразків із провізорних матеріалів Protemp™ 4 (3М ESPE, США), Acrodent (АО СТОМА, Україна). На рис. 4 зображено діаграми розтягу і розподіл амплітуд сигналів АЕ.

Із рис. 4 випливає, що всі досліджувані полімери руйнуються квазікрихко, що характерно для такого роду матеріалів [29]. Для оцінки типів руйнування, які протікають у полімерах, будували неперервне ВП для сигналів АЕ, отриманих за різних значень навантаження (точки А, В, С, D). Обчислені за співвідношенням (1) значення критеріального показника κ представлено у таблиці.

Згідно з критерієм ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів за даними НВП на початкових стадіях у досліджуваних полімерів генеруються сигнали АЕ, що відповідає

Значення критеріального параметра κ сигналів АЕ, згенерованих під час руйнування полімерів за різних значень навантаження

Полімер	κ			
	A	B	C	D
Acrodent	0,13	0,18	0,28	0,09
Protemp™ 4	0,14	0,54	0,12	–

ють в'язко-крихкому руйнуванню ($0,1 \leq \kappa < 0,2$). Почерговість появи сигналів АЕ з високими та низькими значеннями показника κ (див. таблицю) можна розглядати як чергування макророзтріскування матеріалу з утворенням пластичних зон перед макротріщиною, відповідно.

НВП сигналів АЕ, які супроводжують крихке та в'язке чи в'язко-крихке руйнування, має аналогічні до попередніх двох типів матеріалів особливості: для крихкого типу руйнування – порівняно велике значення максимального вейвлет-коефіцієнта WT_{max} та вузька смуга частот Δf у проекції « $WT_{max} - f$ » на рівні $0,7WT_{max}$, в іншому випадку – значення WT_{max} є значно меншим, 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 збільшення розмірів дефекту сприяє зменшенню домінуючої частоти відповідних пружних коливань [26].

Для пояснення досліджених процесів руйнування, які відбуваються під дією навантаження у полімерних матеріалах, вивчали їх мікроструктуру. Матеріал Protemp відрізняється високою гомогенністю, тому під час руйнування є менш АЕ-активний (рис. 4, а). В матеріалі Acrodent пористість значно більша і зосереджена локально, чим пояснюється генерування більшої кількості сигналів АЕ (рис. 4, б). Отримані результати співпадають із представленими у праці [30].

Застосування НВП для оцінки особливостей руйнування композитів. Під час розтягу композитних матеріалів (КМ) розрізняють низку можливих стадій руйнування: поширення тріщини поперек волокон (одночасно з розтріскуванням матриці); поширення тріщини вздовж границі волокно-матриця по всій довжині зразка (відшарування волокон від матриці); накопичення розривів волокон у зразку з ростом навантаження, їх витягування тощо.

Досліджували руйнування під дією квазістатичного розтягу композита, який структурно складався з одиничного р-арамідного волокна у двокомпонентній епоксидній матриці (співвід-

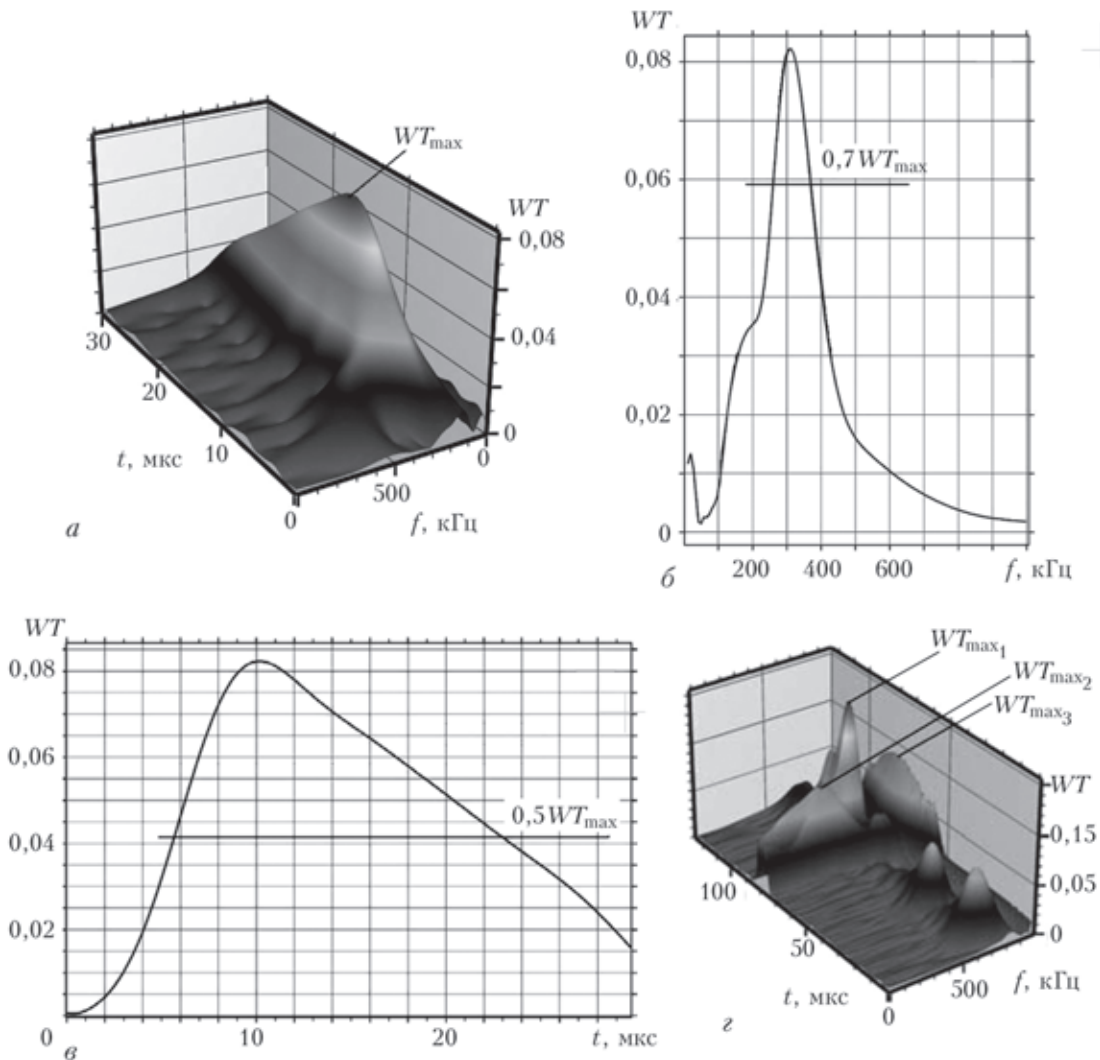


Рис. 5. НВП сигналів АЕ під час руйнування КМ: а, д – 3D-зображення; б – проекція на площину « $WT-f$ » та в – « $WT-t$ » у момент досягнення WT_{max} у події АЕ

ношення затверджувача до епоксидної складової 50:50). Поверхня волокна оброблена плазмою, а його діаметр становив 10 мкм.

Уже на ранніх стадіях руйнування АЕ-вимірвальна система реєструвала сигнали АЕ, амплітуди яких спочатку були невеликі, а згодом зростали. За результатами НВП виділили два типи сигналів АЕ. Для I-го типу особливістю НВП була вузька смуга частот в координатах « $WT-f$ » у момент досягнення максимального значення вейлет-коефіцієнта (рис. 5, б), а тривалість її випромінювання досягала 18 мкс (рис. 5, в). Значення критеріального параметра κ , обчислені за співвідношенням (1), лежали у діапазоні $0,14 \leq \kappa \leq 0,5$, що відповідає крихкому типу руйнування.

Для НВП сигналів АЕ, віднесених до типу II, зазначена вище смуга частот була дещо вужчою, тривалість її випромінювання не перевищувала 12 мкс, критеріальний параметр знаходився в межах $0,2 \leq \kappa \leq 0,3$, що також відповідає крихкому руйнуванню. У першому випадку домінуючі частоти лежали у діапазоні 300...350 кГц, а в другому – 200...300 кГц.

Зважаючи на результати відомих досліджень [31, 32], можна припустити, що джерелом сигналів типу I є відшарування арамідного волокна від матриці або накопичення пошкоджень у самому волокні, а джерелами сигналів типу II могло бути злиття мікротріщин із ростом навантаження, враховуючи звуження смуги частот та зменшення значення домінуючої частоти в НВП локальних максимумів [26]. В обох випадках руйнування відбувається за крихким механізмом, що узгоджується з отриманими кількісними оцінками відповідних сигналів АЕ.

Наприкінці руйнування зразків зареєстровано кілька сигналів АЕ, які мали більше одного спектрального максимуму, що може свідчити про накладання у часі різних механізмів руйнування КМ. На рис. 5, д представлено НВП одного з них. За параметрами НВП подія зі значенням WT_{max1} є аналогічною до сигналів АЕ типу I, але з більшими значеннями критеріального показника $0,52 \leq \kappa \leq 0,54$. Імовірно цей локальний сплеск згенерувався внаслідок розриву арамідного волокна, що призвело до руйнування самого зразка.



Відомо, що під час розтріскування матриці генеруються сигнали АЕ з частотами, нижче 100 кГц [33]. У нашому випадку можна припустити, що подія з $WT_{\max 3}$ відповідає саме цьому механізму руйнування, оскільки частота, за якої досягається даний максимум, $f_{\max} = 60$ кГц. Для $WT_{\max 2}$ характерною є широка частотна смуга, а критеріальний параметр $\kappa = 0,12$, що відповідає в'язко-крихкому руйнуванню. У нашому випадку причиною такого локального максимуму може бути діагональний зсув частин у матриці [34].

Висновки

Проведені експериментальні дослідження показали, що критерій оцінки типів руйнування за локальними особливостями неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ є ефективним інструментом вивчення динаміки процесів руйнування в структурно різних конструкційних матеріалах.

Дослідження руйнування різних типів матеріалів (крихких та в'язких) підтвердили положення лінійної механіки руйнування про наявність процесів пластичного деформування і стрибкоподібного росту тріщин незалежно від їх структури. За параметрами сигналів АЕ, які тісно пов'язані з локальною перебудовою структури матеріалів, можна охарактеризувати особливості кінетики розвитку дефектів та руйнування матеріалу. Зміна критеріального показника у сторону його збільшення слугує ознакою початку розвитку макротріщини в матеріалі, а відтак попередженням про загрозу спонтанного його руйнування.

Реалізація побудованого критерію у програмному забезпеченні сучасних вимірювальних засобів АЕ-діагностування сприятиме підвищенню ефективності діагностичних робіт та неруйнівного контролю виробів та елементів конструкцій.

Рассмотрены особенности сигналов акустической эмиссии при макроразрушении разных конструкционных материалов (корунд, стекло, стали, стоматологические полимеры, композиты). Для этого использованы результаты анализа локальных максимумов непрерывного вейвлет-преобразования сигналов акустической эмиссии. По критерию типов макроразрушения оценено хрупкое, вязко-хрупкое и вязкое разрушения. Установлены характерные отличия сигналов по ширине полосы частот их локальных максимумов, длительности ее излучения и изменению значений доминирующей частоты.

Ключевые слова: разрушение, акустическая эмиссия, непрерывное вейвлет-преобразование, критерий идентификации типов разрушения

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник: у 3 т. – Київ: Наук. думка, 2009. – 887 с.

2. Oxipa T., Kishi T. Мікроруйнування металів і моделювання акустичної емісії // Ніхон кіндзоку гаккайсі. – 1983. – 47, № 7. – С. 575–581.
3. Crack detection in pressure piping by acoustic emission / P. H. Hutton, R. N. Ord, H. N. Pedersen, J. C. Spanner // Nuclear Safety Quarterly Report (July, August, Sept., Oct., 1967) for Nuclear Safety Branch of USAEC Division of Reactor Development and Technology. BNWL-754. – Battelle-Northwest, Richland, Washington. – June 1968. – P. 3.1–3.13.
4. Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture // Nondestructive testing. – 1975. – 8, № 2. – P. 77–85.
5. Залесский В. В., Трипалин А. С., Портной Н. Я. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии // Физ.-матем. исследования. – Ростов-на-Дону, 1972. – С. 91–94.
6. Pardee W., Graham L. J. Analysis of acoustic emission frequency spectra // IEEE Ultrasonic symposium: proc. – Los Angeles, 1975. – P. 597–600.
7. Kline R. A., Hartman W. Frequency analysis of acoustic emission signals // 2nd Intern. conf. on mechanical behaviour of materials: proc. – 1976. – P. 1631–1635.
8. Acoustic emission crack monitoring in fracture-toughness tests for AISI-4340 and SA 533B steels / H. Takahashi, M. A. Khan, M. Kikuchi, M. Suzuki // Experimental Mechanics. – 1981. – 21, № 3. – P. 89–99.
9. Исследование деформирования кремнистого железа методом акустической эмиссии / Г.Б. Муравин, В.М. Финкель, Л.М. Лезвинская, Я.В. Симкин // Дефектоскопия. – 1984. – № 10. – С. 88–91.
10. Спектральный анализ акустической эмиссии растущей трещины / А.Е. Андрейкив, Н.В. Лысак, В.Р. Скальський и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1993. – № 1. – С. 75–94.
11. Lysak M.V. Acoustic emission during jumps in subcritical growth of crack in three-dimensional bodies // Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – 47, № 6. – P. 873–879.
12. Добешу И. Десять лекций по вейвлетам / Пер. с англ. – Ижевск, 2001. – 464 с.
13. Grabowska J., Palacz M., Krawczuk M. Damage identification by wavelet analysis // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2008. – 22. – P. 1623–1635.
14. Kim H., Melhem H. Damage detection of structures by wavelet analysis // Engineering Structures. – 2004. – 26. – P. 347–362.
15. Piotrkowski R., Castro E., Gallego A. Wavelet power, entropy and bispectrum applied to AE signals for damage identification and evaluation of corroded galvanized steel // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – 23. – P. 432–445.
16. Li Y., Yi-Chu Z. Wavelet analysis of acoustic emission signals from thermal barrier coatings // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2006. – 16. – P. 270–275.
17. Khamedi R., Fallahi A., Refahi Oskouei A. Effect of martensite phase volume fraction on acoustic emission signals using wavelet packet analysis during tensile loading of dual phase steels // Materials and Design. – 2010. – 31. – P. 2752–2759.
18. Ni Q.-Q., Iwamoto M. Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites // Engineering Fracture Mechanics. – 2002. – 69. – P. 717–728.
19. Jonson M. Classification of AE transients based on numerical simulations of composite laminates // NDT&E International. – 2003. – 36. – P. 319–329.
20. Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Рамазанов И. С. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 1. – С. 15–19.
21. Ciampa F., Meo M. A new algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2010. – 41. – P. 1777–1786.
22. Бабичева И. Ф., Шарко А. В. Теоретические разработки по использованию вейвлет-анализа и нейросетевых техноло-



- гий в системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2005. – № 2. – С. 17–21.
23. *Velayudham A., Krishnamurthy R., Soundarapandian T.* Acoustic emission based drill condition monitoring during drilling of glass/phenolic polymeric composite using wavelet packet transform // *Materials Sci. and Eng. A* 412. – 2005. – P. 141–145.
 24. *Vallen System: The Acoustic Emission Company* [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: <http://www.vallen.de/products/software/wavelet>. – Title from Screen (12.03.2014).
 25. *Skalsky V., Stankevych O., Serhiyenko O.* Wave displacement field at a half-space surface caused by an internal crack under twisting load // *Wave Motion*. – 2013. – **50**, № 2. – P. 326–333.
 26. *Амплітудно-частотні характеристики пружних коливань поверхні півпростору, послабленого дископодібною тріщиною відриву* / В. Р. Скальський, О. М. Станкевич, В. З. Станкевич, Ю. Я. Матвіїв // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика: Зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3. – С. 175–180.
 27. *Skal'skii V. R., Builo S. I., Stankevich E. M.* A Criterion for Evaluating the Brittle Fracturing of Glass Using Acoustic Emission Signals // *Russian J. of Nondestructive Testing*. – 2012. – **48**, № 5. – P. 277–284.
 28. *Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХН3М-ФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії* / В.Р. Скальський, Л.Р. Ботвіна, О.М. Станкевич та ін. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – №. 3. – С. 12–17.
 29. *Скальський В. Р., Божидарнік В. В., Станкевич О. М.* Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів. – Київ: Наук. думка, 2014. – 264 с.
 30. *Protemp™ 4* [Virtual Resource]. – Access Mode: URL: http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUOx2Bmx_GevUqevTSevTSevTSeSSSSS&fn=protemp_pl_clin_result.pdf. – Title from Screen (02.04.2014).
 31. *Narisawa I., Oba T.* An evaluation of acoustic emission from fibre-reinforced composites. Part 2. The application of acoustic emission techniques to aramid fibre-reinforced model composites // *J. of Materials Sci.* – 1985. – **20**, № 12. – P. 4527–4531.
 32. *Morgan R. G., Pruneda C. O., Steele W. J.* The relationship between the physical structure and the microscopic deformation and failure processes of poly (p-phenylene terephthalamide) fibers (Kevlar-49) // *J. of Polymer Sci.* – 1983. – **21**. – P. 1757–1783.
 33. *Ni Q.-Q., Iwamoto M.* Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2002. – **69**. – P. 717–728.
 34. *Failure modes and fracture mechanisms in flexure of Kevlar-epoxy composites* / M. Davidovitz, A. Mittelman, I. Roman, G. Marom // *Jo. of Materials Sci.* – 1984. – **19**, № 2. – P. 377–384.

Features of acoustic emission signals during macrofracture of different structural materials (corundum, glass, steels, dental polymers, composites) are considered. Results of analysis of local maxima of continuous wavelet-transformation of acoustic emission signals were used for this purpose. Criterion of identification of macrofracture types was used to assess the brittle, ductile-brittle and brittle fracture. Characteristic features of signals by the width of the frequency band of their local maxima, its emission duration and change of dominating frequency values were established. 34 References, 1 Table, 5 Figures.

Keywords: fracture, acoustic emission, continuous wavelet-transformation, criteria of identification of fracture types

*Надійшла до реакції
03.14.2014*

КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ ПО НК В 2015 г.

Дата	Место проведения	Мероприятие
25–27 марта	Львов/Украина	Специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент 2015»
31 марта–02 апреля	Киев/Украина	Международная выставка «Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент»
май	Киев/Украина	Сессия Научного совета по новым материалам МААН
19–22 мая	С.-Петербург/Россия	Выставка-конгресс технологий, оборудования и материалов антикоррозийной защиты и неразрушающего контроля в промышленности
20–22 мая	Ворзель/Киев. обл.	Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии»
01–05 июня	Киев/Украина	Конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий»
09–11 июня	Трускавец/Украина	Конференция «Лазерные технологии, лазеры и их применение»
09–12 июня	Познань/Польша	Ярмарка международной торговли в Познани
15–17 июня	Киев/Украина	Международная научно-техническая конференция «Наплавка. Наука. Производство. Перспективы»
15–19 июня	Созополь, Болгария	Международный форум «NDT Days 2015» и Юбилейная 30-я конференция «Дефектоскопия»
24–26 ноября	Екатеринбург/Россия	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»
24–27 ноября	Киев/Украина	Международный промышленный форум-2015 с разделом «Неразрушающий контроль»



О ВОЗБУЖДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В МЕТАЛЛАХ ЕМКОСТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ. Часть 1

Е. Л. НОЗДРАЧЕВА¹, Г. М. СУЧКОВ¹, О. Н. ПЕТРИЩЕВ², М. И. РОМАНИЮК²

¹НТУ «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21. E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: mail@kpi.ua

Разработана математическая модель емкостного ультразвукового преобразователя, предназначенного для излучения УЗ колебаний в электропроводящее изделие. Рассмотрен первый этап по оценке влияния поляризирующего электростатического поля по формированию сил Кулона в поверхностном слое металлического образца. Получено замкнутое решение задачи электростатики для кусочно-однородной среды, в которой полупространство заполнено металлом с конечными значениями электрической проводимости и магнитной проницаемости. Получено выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца. Выявлены основные влияющие факторы, определяющие пространственное распределение плотности зарядов на поверхности изделия, которые будут формировать диаграмму направленности и мощность излучаемого ультразвукового поля. Библиогр. 9, рис. 3.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, емкостной преобразователь, плотность электрического заряда, электрическое поле, емкость, ультразвуковые колебания

Внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий необходимо не только при производстве, но и при проведении неразрушающего контроля [1]. Разработка новых методов и средств контроля ведется практически во всех ведущих странах мира [2]. Одним из интенсивно развивающихся и внедряемых методов, позволяющий экономить энергию и материалы, является электромагнитно-акустический [3]. Однако он имеет ряд ограничений в некоторых областях применения, в частности, при контроле ферромагнитных материалов, из-за сильного притяжения преобразователя к изделию при контроле сплавов на основе меди и титана. Принципиально улучшить ситуацию возможно за счет применения емкостного метода возбуждения и приема УЗ колебаний. Практически реализуемая чувствительность этого метода сравнительно небольшая [4], поэтому перспективными для практики являются теоретические и экспериментальные разработки, направленные на увеличение чувствительности емкостного метода возбуждения и приема УЗ волн в металлах. Требуется исследовать и определить влияние факторов, определяющих работу емкостных преобразователей, и показать возможные пути повышения их чувствительности.

Общая схема построения математической модели емкостного преобразователя в режиме возбуждения УЗ волн. Рассмотрим преобразователь емкостного типа (рис. 1) в виде металлического круглого диска 1, который располагается на расстоянии δ над поверхностью электропроводного образца 2. На металлический диск подается постоянный во времени электрический по-

тенциал U_0 , который формирует на поверхности металлического образца электрический заряд с поверхностной плотностью $\sigma^0(\rho)$, где ρ, φ, z – координатные линии цилиндрической системы координат, начало которой располагается на поверхности металлического образца (в точке O), а ось z совмещена с осью симметрии диска. Очевидно, что электрические поля и поверхностная плотность $\sigma^0(\rho)$ наведенного электрического заряда не зависят от круговой координаты φ .

Одновременно с постоянным потенциалом U_0 на металлический диск подается изменяющийся во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$; ω – циклическая частота; t – время) электрический потенциал с амплитудным значением U^* . Этот потенциал создает переменное электрическое поле с напряженностью $\vec{E}^* e^{i\omega t}$ (\vec{E}^* – амплитуда вектора напряженности переменного электрического поля).

Пусть выполняется неравенство $U^* \ll U_0$. Тогда поверхностные заряды, которые создаются переменным электрическим полем, можно не принимать в расчет. В таком случае переменное электрическое поле линейно взаимодействует со статическим электрическим зарядом, в результате чего на поверхности $z = 0$ металлического образца возникают силы Кулона с поверхностной плотностью $\sigma_{z\rho}^*(\rho, t)$ и $\sigma_{zz}^*(\rho, t)$. Причем

$$\begin{aligned} \sigma_{z\rho}^*(\rho, t) &= \sigma^0(\rho) E_\rho^*(\rho, 0) e^{i\omega t}, \\ \sigma_{zz}^*(\rho, t) &= \sigma^0(\rho) E_z^*(\rho, 0) e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_\rho^*(\rho, 0)$ и $E_z^*(\rho, 0)$ – амплитудные значения радиального и аксиального компонентов вектора



напряженности переменного электрического поля на поверхности $z = 0$ металлического образца.

Силы Кулона $\sigma_{z\rho}^*(\rho, t)$ и $\sigma_{zz}^*(\rho, t)$ или, используя терминологию механики деформируемого твердого тела, касательные и нормальные поверхностные нагрузки, создают в области существования постоянного и переменного электрических полей динамические деформации поверхности металлического объекта. Из области динамических деформаций избыток энергии выносится упругими волнами в объем металлического образца. Учитывая линейность физической системы и существующих в ней процессов, определим вектор смещения материальных частиц металла как гармонически изменяющуюся во времени величину с амплитудным значением $\vec{u}(x_k, \omega)$, где x_k – координаты точки наблюдения за волновым полем (произвольно выбранная точка A на рис. 1). Амплитудные значения волнового поля смещений $\vec{u}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ в любой точке внутри металлического образца удовлетворяют уравнению установившихся гармонических колебаний. В инвариантной относительно выбора системы координат форме это уравнение записывается так [5]:

$$(\lambda + 2G)\text{grad div } \vec{u}(x_k, \omega) - G\text{rot rot } \vec{u}(x_k, \omega) + \rho_0 \omega^2 \vec{u}(x_k, \omega) = 0, \quad (2)$$

где λ и G – константы Ламе для изотропного по упругим свойствам металла; ρ_0 – плотность металла.

Смещения $\vec{u}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ материальных частиц металла, решения уравнения (2), создают в объеме металла деформации, которым противостоят силы упругости, т. е. механические напряжения $\sigma_{\beta\lambda}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ ($\beta, \lambda = \rho, z$). На поверхности $z = 0$ металла должен выполняться третий закон Ньютона в дифференциальной форме, согласно кото-

рому должны выполняться следующие граничные условия:

$$\sigma_{z\rho}(\rho, 0) = \sigma_{z\rho}^*(\rho), \quad \sigma_{zz}(\rho, 0) = \sigma_{zz}^*(\rho), \quad (3)$$

где $\sigma_{z\rho}^*(\rho)$ и $\sigma_{zz}^*(\rho)$ – амплитудные значения поверхностной плотности сил Кулона (см. выражение (1)).

Выполнение граничных условий (3) обеспечивает единственность решения уравнения (2).

Таким образом, электрическое воздействие $U^*e^{i\omega t}$ на входе преобразователя емкостного типа (рис. 1) формирует вектор смещения материальных частиц $\vec{u}(x_k, \omega)e^{i\omega t}$ в произвольной точке A , т. е. гармонически изменяющееся во времени по закону $e^{i\omega t}$ воздействие порождает изменяющийся по тому же закону отклик. При этом

$$\vec{u}(x_k, \omega) = U^* \vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi), \quad (4)$$

где $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ – векторная функция, зависящая от координат точки A наблюдения за волновым полем, т. е. от набора чисел $x_k \equiv \rho, \phi, z$, круговой частоты ω смены знака воздействия и набора физико-механических параметров (символ Π в списке аргументов векторной функции) описываемой физической системы, т. е. преобразователя емкостного типа. Векторную функцию $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ будем называть передаточной характеристикой емкостного преобразователя в режиме излучения УЗ волн.

В соответствии с определениями академика А.Н. Тихонова [6] векторная функция $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$ имеет смысл математической модели реального объекта, т. е. в данном случае электроакустического преобразователя емкостного типа в режиме излучения УЗ волн.

Из сказанного выше следует, что построение математической модели емкостного преобразователя в режиме излучения УЗ волн естественным образом распадается на две последовательно решаемые задачи.

Первая задача – это задача электродинамики об определении сил Кулона на поверхности металлического образца. Вторая – это граничная задача (2), (3) динамической теории упругости о возбуждении гармонических волн системой поверхностных нагрузок. Решение этой задачи позволит записать в явном виде выражение для расчета компонентов векторной функции $\vec{W}^u(x_k, \omega, \Pi)$, т. е. завершает построение математической модели преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения.

Определение поверхностной плотности $\sigma^0(\rho)$ статического электрического заряда на поверхности металлического образца. Электростатическое поле, которое создается электрически заряженным диском в окружающем его воздушном пространстве, можно описать с помощью скаляр-

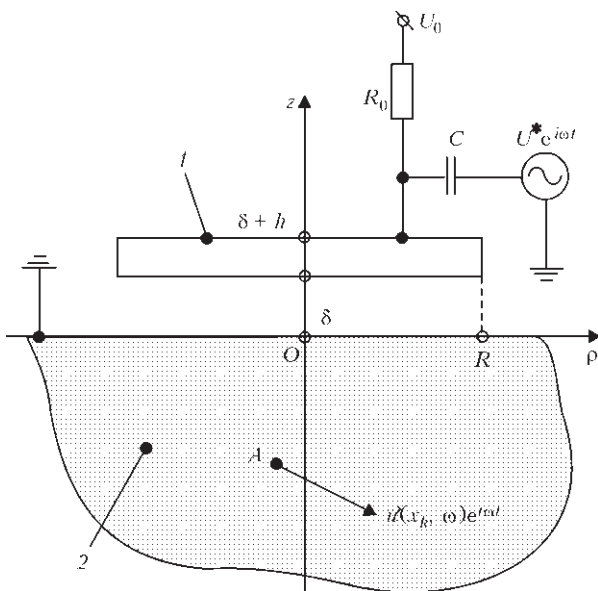


Рис. 1. Расчетная схема электроакустического преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения УЗ волн в металлическом образце



ного осесимметричного электрического потенциала $\Phi^0(\rho, z)$, где ρ и z – радиальная и аксиальная координаты цилиндрической системы координат ρ, φ, z (рис. 1). Скалярный потенциал $\Phi^0(\rho, z)$ удовлетворяет уравнению Пуассона [7]

$$\nabla^2 \Phi^0(\rho, z) = -\rho_e / \chi_0, \quad (5)$$

где ρ_e – объемная плотность статического электрического заряда в металлическом диске; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость окружающего диск пространства.

Будем считать, что статический электрический заряд в объеме диска $V = \pi R^2 h$ (R – радиус диска, h – его толщина) распределен равномерно и поэтому

$$\rho_e = \frac{C_0 U_0}{\pi R^2 h} f(\rho) f(z), \quad (6)$$

где $C_0 = \pi R^2 \chi_0 / \delta$ – статическая электрическая емкость диска над поверхностью металлического изделия.

Металлический образец для упрощения последующих выкладок заменим полупространством $z \leq 0$ с изотропной удельной электрической проводимостью r (См/м) и магнитной проницаемостью μ (Гн/м). Функции $f(\rho)$ и $f(z)$ задаются следующим образом:

$$f(\rho) = \begin{cases} 1 \forall \rho \in [0, R], \\ 0 \forall \rho \notin [0, R], \end{cases} \quad f(z) = \begin{cases} 1 \forall z \in [\delta, \delta + h], \\ 0 \forall z \notin [\delta, \delta + h]. \end{cases} \quad (7)$$

Так как в статической ситуации электрический ток по поверхности $z = 0$ не протекает, то радиальный компонент $E_\rho^0(\rho, z) = -\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial \rho$ вектора напряженности статического электрического поля на поверхности металла должен быть равен нулю. В противном случае по поверхности металла протекал бы электрический ток с поверхностной плотностью $j_\rho^0(\rho) = r E_\rho^0(\rho, 0)$ и статический заряд в этом случае был бы равен нулю. Таким образом, решение уравнения (5) на границе $z = 0$ должно удовлетворять следующему условию:

$$\left. \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{z=0} = 0. \quad (8)$$

Помимо этого, скалярный потенциал $\Phi^0(\rho, z)$ и его первые производные $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial \rho$ и $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial z$ должны удовлетворять условию физической реализуемости источника поля, т. е. удовлетворять предельным условиям:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \left\{ \Phi^0(\rho, z), \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho}, \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial z} \right\} = 0, \quad (9)$$

где $L = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ – расстояние от металлического диска.

Физический смысл условия (9) очевиден – источник конечной мощности создает электри-

ческое поле, потенциал которого и компоненты вектора напряженности обращаются в нуль при бесконечном удалении от него.

Развернутая форма записи уравнения (5) имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right] + \frac{\partial^2 \Phi^0(\rho, z)}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\chi_0}. \quad (10)$$

Предельное условие (9) позволяет применить для решения уравнения (10) интегральное преобразование Ханкеля [3] с ядром $J_0(\gamma \rho)$ ($J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка; γ – параметр интегрального преобразования – действительное число).

Прямое преобразование Ханкеля определяется соотношением [8]:

$$\Phi^0(\gamma, z) = \int_0^\infty \rho \Phi^0(\rho, z) J_0(\gamma \rho) d\rho, \quad (11)$$

где $\Phi^0(\gamma, z)$ – интегральный образ по Ханкелю или просто образ функции (оригинала) $\Phi^0(\rho, z)$.

Прямому преобразованию Ханкеля (11) соответствует обратное преобразование, которое определяется следующим выражением:

$$\Phi^0(\rho, z) = \int_0^\infty \gamma \Phi^0(\gamma, z) J_0(\gamma \rho) d\gamma. \quad (12)$$

Интегрируя дважды по частям и принимая при этом во внимание предельное условие (9), можно показать, что

$$\int_0^\infty \rho \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right] \right\} J_0(\gamma \rho) d\rho = -\gamma^2 \Phi^0(\gamma, z). \quad (13)$$

Воздействуя на левую и правую части уравнения (10) интегральным преобразованием (11), получаем, с учетом соотношения (13), следующее уравнение для интегрального образа $\Phi^0(\gamma, z)$ скалярного потенциала:

$$\frac{d^2 \Phi^0(\gamma, z)}{dz^2} - \gamma^2 \Phi^0(\gamma, z) = -\frac{\rho_e(\gamma)}{\chi_0} f(z), \quad (14)$$

где $\rho_e = \frac{C_0 U_0}{\pi h} \frac{J_1(\gamma R)}{\gamma R}$ – интегральный образ объемной плотности электрического заряда металлического диска ($J_1(x)$ – функция Бесселя первого порядка).

Общее решение обыкновенного дифференциального уравнения (14) известно:

$$\Phi^0(\gamma, z) = [A + A(z)] e^{\gamma z} + [B + B(z)] e^{-\gamma z}, \quad (15)$$

где A, B – константы; $A(z)$ и $B(z)$ – варьируемые константы, которые удовлетворяют условию минимума вычислений, т. е.

$$A'(z) e^{\gamma z} + B'(z) e^{-\gamma z} = 0, \quad (16)$$

где штрих означает первую производную по переменной z .



Подстановка общего решения (15) в уравнение (14) после вычисления производных с учетом условия (16) дает следующий результат:

$$\gamma A'(z)e^{\gamma z} - \gamma B'(z)e^{-\gamma z} = -\frac{\rho_e(\gamma)}{\chi_0} f(z). \quad (17)$$

Условие (16) и уравнение (17) образуют алгебраическую систему уравнений, которая единственным образом разрешается относительно производных варьируемых констант $A(z)$ и $B(z)$. Интегрируя найденные производные по переменной z , получаем

$$\begin{aligned} A(z) &= -\frac{1}{2\gamma\chi_0} \int_0^{z \leq \delta+h} \rho_e(\gamma) f(x) e^{-\gamma x} dx = \\ &= -\frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma h \chi_0} \frac{J_1(\gamma R)}{\gamma R} \int_{\delta}^{z \leq \delta+h} e^{-\gamma x} dx, \\ B(z) &= \frac{1}{2\gamma\chi_0} \int_0^{z \leq \delta+h} \rho_e(\gamma) f(x) e^{\gamma x} dx = \\ &= \frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma h \chi_0} \frac{J_1(\gamma R)}{\gamma R} \int_{\delta}^{z \leq \delta+h} e^{\gamma x} dx. \end{aligned} \quad (18)$$

При неограниченном возрастании аксиальной координаты z первое слагаемое в общем решении (15) стремится к бесконечности и тем самым нарушается предельное условие (9). Во избежание противоречий необходимо и достаточно положить, что

$$A = -A(\delta + h) = \frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma\chi_0} W(\gamma), \quad (19)$$

где $W(\gamma) = e^{-\gamma\delta} \frac{(1 - e^{-\gamma h}) J_1(\gamma R)}{\gamma h \gamma R}$ – функция, которая учитывает влияние геометрических параметров емкостного преобразователя на характер распределения электрического поля в окружающем пространстве. Таким образом,

$$\Phi^0(\gamma, z) = \left[\frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma\chi_0} W(\gamma) + A(z) \right] e^{\gamma z} + [B + B(z)] e^{-\gamma z}. \quad (20)$$

Из определений (18) следует, что при $z < \delta$, т. е. в области под металлическим диском варьируемые коэффициенты $A(z) = B(z) = 0$ и выражение (20) принимает следующий вид:

$$\Phi^0(\gamma, z) = \frac{C_0 U_0}{2\pi\gamma\chi_0} W(\gamma) e^{\gamma z} + B e^{-\gamma z}, \quad 0 \leq z \leq \delta. \quad (21)$$

Определим интегральный образ радиального компонента $E_\rho^0(\rho, z)$ вектора напряженности статического электрического поля следующим образом:

$$E_\rho^0(\gamma, z) = \int_0^\infty \rho E_\rho^0(\rho, z) J_1(\gamma \rho) d\rho. \quad (22)$$

Подставляя в определение (22) вместо символа $E_\rho^0(\rho, z)$ первую производную от электрического потенциала ($E_\rho^0(\rho, z) = -\partial\Phi^0(\rho, z)/\partial\rho$), после интегрирования по частям получаем следующий результат:

$$E_\rho^0(\gamma, z) = \gamma \int_0^\infty \rho \Phi^0(\rho, z) J_0(\gamma \rho) d\rho = \gamma \Phi^0(\gamma, z). \quad (23)$$

Из граничных условий (8) следует, что константа $B = -C_0 U_0 W(\gamma)/(2\pi\gamma\chi_0)$. После этого выражение для расчета интегрального образа скалярного потенциала в области $0 \leq z \leq \delta$ принимает следующий вид:

$$\Phi^0(\gamma, z) = \frac{C_0 U_0}{\pi\gamma\chi_0} W(\gamma) \text{sh}(\gamma z), \quad 0 \leq z \leq \delta. \quad (24)$$

Аксиальный компонент

$$E_z^0(\rho, z) = -\partial\Phi^0(\rho, z)/\partial z$$

вектора напряженности электростатического поля имеет интегральный образ

$$E_z^0(\gamma, z) = -\partial\Phi^0(\gamma, z)/\partial z, \quad \text{т. е.}$$

$$E_z^0(\gamma, z) = -\frac{C_0 U_0}{\pi\chi_0} W(\gamma) \text{ch}(\gamma z), \quad 0 \leq z \leq \delta. \quad (25)$$

Из теории электрических явлений известно [8], что поверхностная плотность электрического заряда на поверхности $z = 0$, разделяющей металл и вакуум, определяется следующим образом:

$$\sigma^0(\rho) = \chi_0 E_z^0(\rho, 0). \quad (26)$$

Воздействуя на левую и правую части соотношения (26) интегральным преобразованием (11), получаем

$$\sigma^0(\gamma) = \chi_0 E_z^0(\gamma, 0) = -\frac{C_0 U_0}{\pi} W(\gamma). \quad (27)$$

Подвергая соотношение (27) обратному преобразованию Ханкеля (12), получаем выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца

$$\sigma^0(\rho) = -\frac{C_0 U_0}{\pi} \int_0^\infty \gamma W(\gamma) J_0(\gamma \rho) d\gamma. \quad (28)$$

Интеграл (28) определяется численно. Особенностью вычисления интеграла (28) является то, что верхний предел интегрирования является бесконечно большим. В реальном машинном счете верхний предел интегрирования должен быть конечной величиной. Очевидно, что, в первом приближении такой величиной должно быть действительное число γ_{\max} , начиная с которого выполняется неравенство $\gamma W(\gamma) < \varepsilon \forall \gamma > \gamma_{\max}$, где ε – наперед заданное малое число. Поскольку сомножитель $|J_0(\gamma \rho)| \leq 1$, то в записанном выше не-

равенстве было использовано максимальное значение функции Бесселя нулевого порядка, т. е. единица.

На рис. 2 показано изменение фрагмента подынтегрального выражения $xW(x)$ в зависимости от безразмерного параметра интегрального преобразования $x = \gamma R$, где R – радиус металлического диска. При этом функция $W(x)$ рассчитывается по формуле:

$$W(x) = e^{-x\delta/R} \frac{(1 - e^{-xh/R}) J_1(x)}{(xh/R) x}$$

По оси ординат на рис. 2 отложены значения модуля функции $xW(x)$, по оси абсцисс – безразмерный параметр интегрального преобразования x .

На рис. 2, а показаны графики функции $xW(x)$ для фиксированного значения $\delta/R = 0,04$ и варьируемых значений безразмерной толщины диска h/R . На рис. 2, б показаны значения модуля функции $xW(x)$ для фиксированного значения $h/R = 0,2$ и варьируемых значений относительного неконтакта δ/R .

Из представленных на рис. 2 результатов следует, что при $x > 20$ произведение $xW(x) < 0,02$ для произвольных (ненулевых) значений δ/R и h/R . Если учесть, что при $\rho/R > 0$ функция Бесселя $J_0(x\rho/R) < 1$, то можно утверждать, что основной вклад в интеграл (28) осуществляют значения по-

дынтегральной функции на интервале интегрирования $0 \leq x \leq 20$.

Таким образом, при выполнении вычислений значения интеграла (28) вместо бесконечного предела интегрирования можно подставить любое безразмерное число $x_{\max} > 20$.

На рис. 3 показаны результаты вычисления поверхностной плотности $\sigma^0(\rho)$ статического электрического заряда по формуле (28), которая в терминах безразмерного параметра x записывается следующим образом:

$$\sigma^0(\rho/R) = -\frac{C_0 U_0}{\pi R^2} \int_0^{x_{\max}} xW(x) J_0(x\rho/R) dx$$

Анализ полученного выражения показывает, что поскольку характеристики акустического поля зависят от пространственного распределения зарядов на поверхности полупространства, то его будут определять следующие основные факторы. Это поляризующее напряжение; емкость преобразователя (диэлектрическая проницаемость); размер преобразователя; величина зазора между преобразователем и изделием; форма преобразователя.

При выполнении расчетов статическая электрическая емкость C_0 рассчитывалась по приближенной формуле $C_0 = \pi R^2 \chi_0 / \delta$, которая дает несколько заниженную оценку реального значения этой величины. Для отображения результатов счета в абсолютных величинах были приняты следующие значения параметров: $U_0 = 100$ В и $R = 5$ мм. При вычислении интеграла верхний предел интегрирования был принят равным $x_{\max} > 40$. Интервал интегрирования был разделен на 400 отрезков. По оси ординат на рис. 3 отложены значения $\sigma^0(\rho)$ в микрокулонах, деленных на метр квадратный, взятые с обратным знаком. По оси абсцисс отсчитываются безразмерные расстояния ρ/R от центра

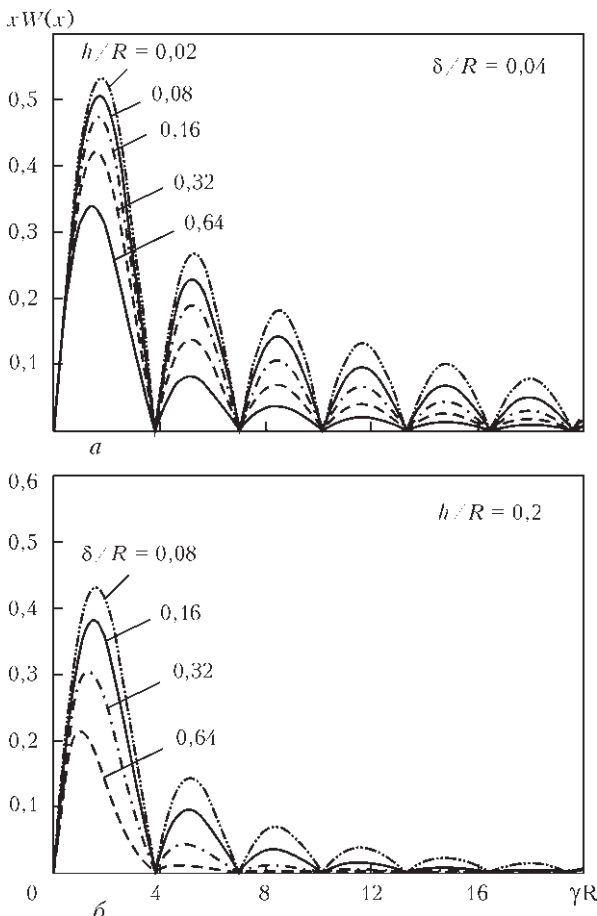


Рис. 2. Изменение модуля фрагмента подынтегрального выражения (28)

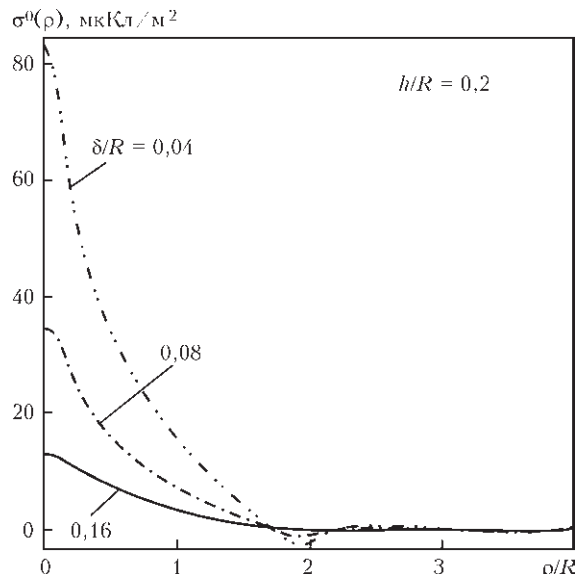


Рис. 3. Распределение электростатического заряда на поверхности металлического полупространства



металлического диска. Варьируемым параметром семейства кривых, которые показаны на рис. 3, является величина безразмерного неконтакта δ/R .

Анализ данных, приведенных на рис. 3, показывает, что заряды на поверхности полубесконечного пространства под проводящим диском располагаются неравномерно. Их плотность уменьшается по мере удаления от оси диска. Более того, часть зарядов на поверхности полупространства располагается вне пределов проекции проводящего диска, полученные результаты качественно подтверждаются данными работы [9]. Этот результат также подтвержден авторами экспериментально, о чем будет сообщено в последующих статьях.

Выводы

Разработана математическая модель преобразователя емкостного типа в режиме возбуждения УЗ волн в металлах.

Построено замкнутое решение задачи электростатики для кусочно-однородной среды, в которой полупространство $z < 0$ заполнено металлом с конечными значениями электрической проводимости и магнитной проницаемости. Получено выражение для расчета поверхностной плотности статического электрического заряда на поверхности металлического образца.

Показано, что основными влияющими факторами, определяющими плотность зарядов в

поверхностном слое металла (а следовательно, мощность и диаграмму направленности возбуждаемого УЗ поля) являются: поляризующее напряжение; емкость преобразователя (диэлектрическая проницаемость); размер преобразователя; величина зазора между преобразователем и изделием; форма преобразователя.

Во второй части работы будут определены характеристики переменного электрического поля емкостного преобразователя и сформулированы количественные оценки поверхностной плотности сил Кулона, что позволит экспериментально проверить полученные теоретические результаты.

1. Судакова К. В., Казюкевич И. Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразруш. контроля. – 2004. – № 3. – С. 8–10.
2. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
3. Сучков Г. М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2005. – № 12. – С. 24–39.
4. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
5. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 873 с.
6. Тихонов А. Н. Математическая модель // Математическая энциклопедия. Т. 3. – М.: Сов. энциклопедия, 1982. – 1184 с.
7. Морс Ф. М., Феибах Г. Методы теоретической физики. Т.2. – М.: ИЛ, 1960. — 886 с.
8. Тамм И. Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.5 Электричество и магнетизм. – М.: Мир, 1966. – 296 с.

A mathematical model was developed of capacitive ultrasonic transducer designed for application of ultrasonic oscillations to electrically-conducting item. The first stage on evaluation of the influence of polarizing electrostatic field on generation of Coulomb forces in the surface layer of metal sample is considered. A closed solution of the problem of electrostatics for piecewise-uniform medium, in which the half-space is filled with metal with finite values of electric conductivity and magnetic permeability, was derived. An expression was obtained for calculation of surface density of static electric charge on metal sample surface. Main influencing factors determining the spatial distribution of charge density over the item surface, which will form the directional pattern and strength of emitted ultrasonic field, are revealed. 9 References, 3 Figures.

Keywords: ultrasonic testing, capacitive transducer, electric charge density, electric field, capacitance, ultrasonic oscillations

Поступила в редакцию
27.11.2014

УЧБОВИЙ ЦЕНТР З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДП «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О.ПАТОНА НАН УКРАЇНИ»

проводить в м. Києві в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

навчальні курси підготовки фахівців з неруйнівного контролю за методами:

ультразвуковий • радіографічний • магнітний • капілярний • візуальний

контроль герметичності • вихрострумний • акустико-емісійний • вібродіагностичний

для подальшої сертифікації згідно вимог Європейського стандарту EN ISO 9712:2012 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація і сертифікація персоналу в галузі НК» по 12-ти виробничих секторах.

Адреса проведення навчання:

м. Київ, вул. Боженко, 23, ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, корпус 6

Детальна інформація:

тел.: (044) 200-46-66, тел./факс: (044) 205-31-66

E-mail: ndt@paton.kiev.ua; інтернет: www.usndt.com.ua (розділ «Сертифікація»)



КОМПЛЕКСНАЯ СОПОСТАВИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ TP 316L, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ

Т. Н. БУРЯК, А. А. ТАРАНЕНКО, Н. В. ЯРОШЕНКО, С. П. БУСЬКО, А. Д. МАЛЫШ
 ГП «НИТИ». 49005, г. Днепропетровск, ул. Писаржевского, 1, а. E-mail: lab241@i.ua

Предложена модель системы управления качеством на основе комплексного подхода и выполнена сопоставительная оценка сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали TP 316L производства Украины, Германии, Италии. Исследованы геометрические, механические, технологические, металлографические, коррозионные, физические показатели. Установлено соответствие стабильно высокого качества труб различных производителей основным и дополнительным требованиям стандартов ASTM и EN, что достигается благодаря качественному металлу и стабильности технологии изготовления труб. Библиогр. 5, табл. 3, рис. 4.

Ключевые слова: комплексный подход, контроль, стабильность, качество, труба, сварной шов, структура, механические свойства

В настоящее время все большее применение находят сварные трубы малых размеров из коррозионностойких материалов (титана, коррозионностойких марок стали) [1–3]. Поскольку данные трубы отличаются снижением стоимости от 20 до 35 % по отношению к бесшовным из аналогичной стали, особый интерес проявляется к высоколиквидным трубам прецизионного сортамента – особотонкостенным, высокоточным, длинномерным с повышенными техническими характеристиками. Такой сортамент может быть сложным для исполнения в бесшовном варианте, но может быть получен на современных производствах сварным способом. В данной работе разработана программа и осуществлены комплексные исследования качественных показателей сварных труб из коррозионностойкой стали различных производителей из Украины, Италии, Германии.

Материалом исследования служили трубы диаметром от 20 до 28 мм с толщиной стенки от 0,7 до 1,0 мм, длиной от 9 до 15 м из высоколегированной многокомпонентной стали аустенитного класса TP 316L по ASTM и ее аналогов 1.4404 и 1.4435 по EN (табл. 1) [4, 5]. Модель управления качеством и программа испытаний включали оценку на соответствие основным и дополнительным требованиям стандартов ASTM A 249 и EN 10217-7 (рис. 1, 2). На рис. 2: 1 – *визуальный осмотр*: 1.1 – оценка макроструктуры; 1.2 – контроль геометрических размеров; 2 – *химический анализ*; 3 – *механические испытания*: 3.1 – растяжение при $T_{исп} = 20\text{ }^\circ\text{C}$; 3.1.1 – продольное патрубков; 3.2.2 – поперечное кольцевых образцов; 4 – *технологические испытания*: 4.1 – сплющивание; 4.2 – статический загиб; 4.3 – раздача; 4.4 – бортование; 4.5 – загиб с перегибом; 5 – *металлографические*: 5.1 – оценка величины зерна; 5.2 – микроструктура шва и околошовной зоны; 5.3 – неметаллические включения; 5.4 – топография поверхности; 6 – *коррозионные испытания*: 6.1 –

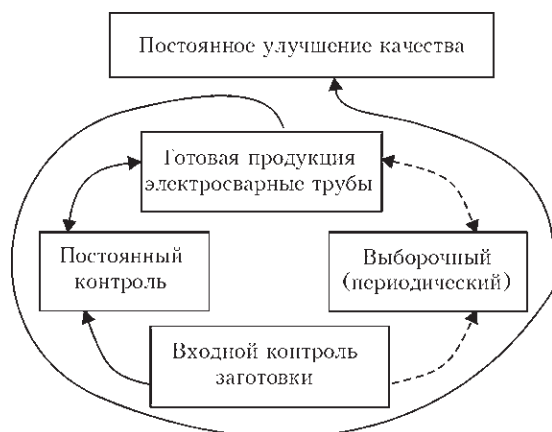


Рис. 1. Модель системы управления качеством продукции (труб) на основе системного подхода

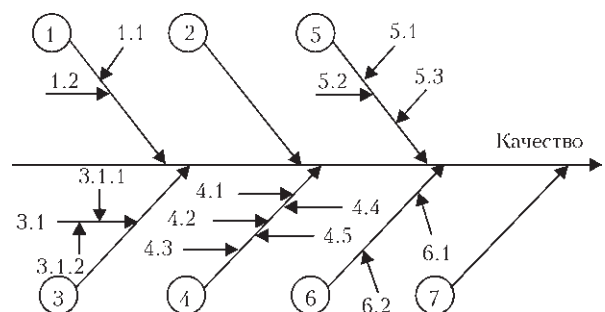


Рис. 2. Структура программных испытаний

© Т. Н. Буряк, А. А. Тараненко, Н. В. Ярошенко, С. П. Бусько, А. Д. Малыш, 2015

МКК (метод АМУ); 6.1 – питтинговая коррозия; 7 – *неразрушающий контроль (УЗК, ВТК)*.

При выборе методов исследования применен комплексный подход: использование труб предполагается в Украине, но изготовлены они по зарубежным стандартам, поэтому использованы стандартизованные отечественные и зарубежные методики, а также дополнительные материаловедческие и физические исследования. Испытания выполнены на базе Научно-инженерного центра ГП «НИТИ», аккредитованного на техническую компетентность по ДСТУ ISO/IEC 17025:2006.

Трубы изготовлены в условиях современных производств аргоно-дуговой сваркой, метод ТИГ, коэффициент шва $V=1$, с выполнением термообработки в защитной атмосфере. Сталь, как правило, получают с применением способа аргоно-кислородного дутья (АОД процесс), что обеспечивает в заготовке чистоту по неметаллическим включениям, снижение содержания углерода и серы.

Установлено, что химический состав труб различных производителей напрямую зависит от особенностей выбранного поставщика металла, при этом на содержание углерода может влиять технология производства труб. Так, в трубах производства Украины низкое содержание углерода (0,015...0,016 %), но несколько повышенное по сравнению с исходным штрипсом (0,011 %) и довольно высокое содержание фосфора (0,043...0,044 %). В трубах импортного производства более высокое содержание углерода (0,037...0,038 % – Италия, 0,027...0,032 % – Германия), но более низкое содержание фосфора

(0,013 % – Италия, 0,0310...0,032 % – Германия). Содержание серы отличается незначительно – колеблется от 0,0077 до 0,012 %, а содержание дорогостоящих элементов никеля и молибдена находится на нижнем пределе. В целом, с учетом допустимых отклонений и ошибки измерения, исследуемый металл соответствовал нормативу, приведенному в табл. 1.

Визуальный осмотр труб показал светлую, чистую поверхность с отсутствием грата за счет деформации (раскатки) и зачистки сварного шва. Причем отечественные трубы получены по двум вариантам: с деформацией шва («р») и без деформации шва («н»), высота внутреннего грата в последнем варианте до 1 мм. Недопустимые дефекты не обнаружены во всех случаях. По геометрическим размерам и отклонениям по диаметру и толщине стенки все трубы соответствовали высокой точности изготовления.

Металлографическими исследованиями установлено, что в шве и околошовной зоне поры, трещины, непровары, инородные включения, проплавления и другие дефекты отсутствуют независимо от варианта изготовления (рис. 3). В микроструктуре труб четко различимы: основной металл с рекристаллизованными зернами аустенита (рис. 4, а, табл. 2), небольшая околошовная зона (до 200 мкм) с незначительным на 1–2 номера укрупнением зерна по отношению к основному металлу, сварной шов с морфологией дендритоподобной (литой) структуры и наличием в ней небольшой доли ферритной составляющей (рис. 4, б). Структура основного металла мелкозернистая с величиной зерна от

Таблица 1. Химический состав стали TP 316L и ее аналогов в соответствии с требованиями стандартов

Стандарт	Номер (марка) стали	C*	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Mo
ASTM A 249	316L	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,030	–	16,0...18,0	10,0...14,0	2,0...3,0
EN 10217-7	1.4404	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	≤ 0,11	16,50...18,5	10,0...13,0	2,0...2,5
EN 10217-7	1.4435	max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	≤ 0,11	17,0...19,0	12,5...15,0	2,5...3,0

*Для особотонкостенных труб допускается содержание углерода 0,040 % max

Таблица 2. Механические свойства и величина зерна основного металла труб в соответствии с требованиями стандартов

Размер, мм; марка стали (производитель)	σ_B , Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	$\sigma_{1,0}$, Н/мм ²	δ_{50} , %	δ_5 , %	Номер зерна
Ø28×0,7; TP316L (Германия)	559...607	269...315	Не определяли	59,0...59,0	60,0...60,0	9
Ø25,4×0,71; 1.4404 (Италия)	615...605	292...301	348...329	65,0...58,5	67,5...62,5	7
Ø22,0×1,0; 1.4435 (Италия)	563...566	292...297	323...330	62,0...60,0	64,0...63,5	6
Ø20,0×0,8, «р»; TP316L (Украина)	617...623	349...347	370...372	55,0...56...5	57,5...59,5	8
Ø20,0×0,8, «н»; TP316L (Украина)	588...602	306...322	335...347	56,0...58,0	57,0...62,0	7
Нормы ASTM A249	min 485	min 170	–	min 35	–	–
Нормы EN 10217-7	490...690	min 190	min 225	min 30	min 40	–

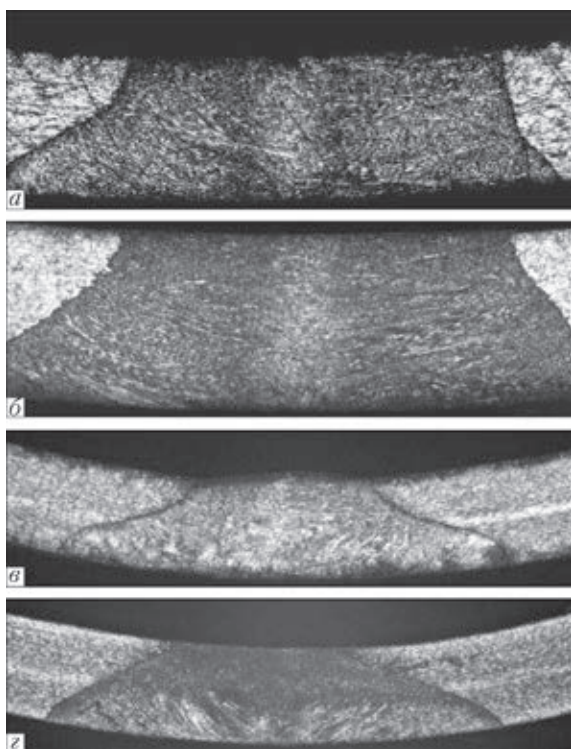


Рис. 3. Макроструктура ($\times 12$) сварного соединения труб различных производителей, : а – Германия; б – Италия; в – Украина (шов без деформации); г – Украина (деформированный шов)

№ 6 до № 9, отличается, очевидно, в зависимости от структуры исходного штрипса у различных производителей (табл. 2).

Механические свойства определяли путем испытаний на растяжение продольных патрубков (табл. 2) и на разрыв поперечных кольцевых образцов (табл.3). Из результатов контроля видно, что механические характеристики труб удовлетворяют требованиям стандартов: трубы характеризуются высоким комплексом прочностных и пластических свойств, без существенных отличительных особенностей (табл. 2). В большей степени на формирование уровня механических свойств в трубах влияет химический состав и величина зерна в заготовке.

Трубы выдержали технологические испытания на параметры, заданные в соответствии с конкретными размерами исследуемых образцов: все виды сплющивания (на заданное расстояние, полное, обратное), статический загиб патрубка, изгиб с перегибом полосы со швом, раздачу, бортование. После всех этих испытаний на образцах отсут-

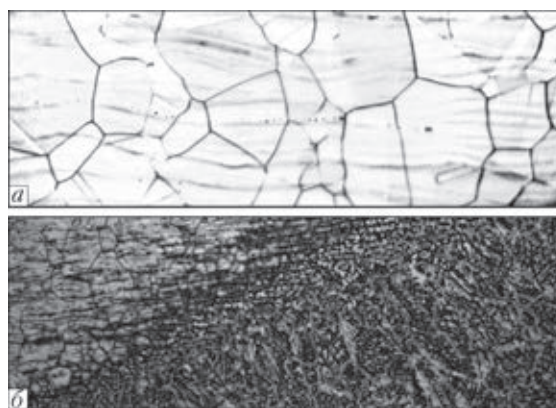


Рис. 4. Типичная микроструктура электросварных труб: а – основной металл ($\times 200$); б – околошовная зона + шов ($\times 100$) ствовали дефекты в виде трещин, надрывов, непроваров, проплавлений и перекрытий.

Не менее важным является испытание на разрыв поперечных кольцевых образцов для определения прочности сварных соединений с расположением шва 90° относительно оси приложения усилия (или 3 ч). По уровню предела прочности получены удовлетворительные результаты по всем вариантам. Разрушение образцов по шву не произошло в трубах с деформацией (раскаткой) шва, образцы без раскатки разрушились в области шва (табл. 3).

Также выполнены контрольные испытания на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) по методу АМУ кипячением образцов в сернокислотном растворе сульфата меди в течение 8 ч. Обычно сварные соединения, наплавленный металл и металл шва предшествующему провоцирующему нагреву не подвергаются. В данном случае испытания были выполнены как без провоцирующего нагрева, так и в ужесточенных условиях с провоцирующим нагревом при 650°C , выдержка 1 ч. Трещин в местах Z-образных изгибов образцов не выявлено как на внутренней, так и на наружной поверхности труб. Таким образом, сварные трубы всех производителей из стали TP 316L и ее аналогов 1.4404 и 1.4435, характеризуются высокой стойкостью к МКК основного металла, сварного шва и околошовной зоны.

При производстве и диагностике сварных труб особая роль отводится неразрушающим видам контроля. Вихретоковый контроль (ВТК) является обязательным, а ультразвуковой (УЗК) дополнитель-

Таблица 3. Испытания на разрыв поперечных кольцевых образцов для определения прочности шва

Размер, мм (производитель)	σ_B , Н/мм ²	Место разрыва
Ø28×0,7 (Германия)	603	по основному металлу
	573...619	по основному металлу или в конце зоны термического влияния
Ø25,4×0,71 (Италия)	591...606	по основному металлу
Ø22,0×1,0 (Италия)	565...558	->-
Ø20,0×0,8, вар. «р» (Украина)	639...693	->-
Ø20,0×0,8, вар. «н» (Украина)	642...673	по шву или в зоне термического влияния (разрушение пластичное)



ным. От проведения испытаний гидравлическим давлением данного вида труб зачастую отказываются и изготовители, и потребители, так как требуется просушивание внутреннего канала, иначе могут возникнуть проблемы, связанные с коррозией, кроме того, в особотонкостенных трубах могут возникнуть дополнительные напряжения, что также оказывает отрицательное влияние. ВТК установлен в поточной линии трубоэлектросварочных станков на производстве. Контроль проводится в два этапа: контроль шва (качества сварки), а затем тела трубы на наличие продольных и поперечных дефектов по наружной и внутренней поверхности. По сертификатным данным производителей все представленные трубы годные, т.е. прошли 100 % ВТК.

При выполнении УЗК сварных труб исследуемого сортамента следует иметь в виду, что отличия в структурных параметрах, выраженные в том, что имеются основной металл, околошовная зона или зона термического влияния и шов, где равноосная рекристаллизованная структура аустенита в основном металле отличается от литой структуры с наличием феррита в шве, могут приводить к возникновению сигналов.

В условиях ГП «НИТИ» выполнен ультразвуковой контроль образцов труб $\varnothing 20,0 \times 0,8$ мм, изготовленных в Украине, на отрезках по 1,5 м, полученным по двум вариантам: с деформацией (раскаткой) шва «р» и с нераскатанным швом «н». Соответственно были изготовлены два стандартных образца для настройки УЗ-дефектоскопа с искусственными дефектами типа «риска» глубиной 10 % номинальной толщины стенки. Параметры искусственных продольных отражателей типа «риска»: длина 9,7 мм, ширина 0,175 мм, глубина 0,088 мм. В трубах по варианту «н» регистрировались сигналы от сварного шва, которые на 6 ДБ меньше, чем сигналы от искусственных дефектов. В связи с этим, при организации автоматизированного УЗК в условиях полномасштабного производства может возникнуть проблема перебраковки труб данного типа. В целом, следует констатировать, что в трубах отечественного производителя, изготовленных и проконтролированных по двум вариантам, не выявлены дефекты, эквивалентные искусственным дефектам стандартного образца,

т.е. трубы годные в соответствии с установленными требованиями. В настоящее время проводятся работы по УЗК с поперечной ориентацией искусственного дефекта типа «риска».

Выводы

Выполнены комплексные сопоставительные исследования качественных показателей сварных особотонкостенных длинномерных труб из коррозионностойкой стали TP 316L различных производителей Украины, Италии, Германии. На основании результатов испытаний установлено, что полученные в условиях современных производств трубы по уровню геометрических, механических, технологических, металлографических, коррозионных и физических параметров, отвечают основным и дополнительным требованиям международных стандартов, в частности, евро нормам. Сравнительная оценка качества труб не выявила существенных различий, трубы, полученные в различных условиях, по уровню проконтролированных показателей сопоставимы между собой. Таким образом, все сказанное выше свидетельствует о стабильности производства и является гарантией надежности и высокого качества сварных труб. Предложена модель системы управления качеством на основе комплексного подхода с целью объективного выбора изготовителя заданного вида заготовки и труб с гарантией стабильного качества продукции.

1. Оценка качества сварных длинномерных особотонкостенных труб из коррозионностойкой стали / Т.Н. Буряк, Н.В. Ярошенко, А.А. Тараненко, А.М. Лавриненко // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2014. – № 5. – С. 40–43.
2. Хэнсон К. Ф. Тенденции использования титана в теплообменных аппаратах // Матер. 3-й Междунар. конф. «Титан. Металловедение и технология». – М.: ВИЛС, 1978. – С. 423–435.
3. Обоснование материала для замены конденсаторов турбоагрегатов АЭС и создание технических условий на длинномерные трубы: Отчет о НИР / ГП «НИТИ», № 108-206; ГР № 0106U012027. – Днепропетровск, 2006. – 65 с.
4. ASTM A249/A249M-10a. Стандартная спецификация на сварные трубы из аустенитной стали для котлов, пароперегревателей, теплообменников и конденсаторов. – ASTM Комитет США, 2010. – 10 с.
5. EN 10217-7:2005. Сварные стальные трубы для работы под давлением. Технические условия поставки. – Ч. 7: Трубы из нержавеющей стали. – Европ. комитет по стандартизации (CEN). – Брюссель, 2005. – 38 с.

A model of quality management system, based on an integrated approach is proposed, and comparative evaluation of welded extended superthin-wall pipes from corrosion-resistant TR 316L steel manufactured in Ukraine, Germany, and Italy, was performed. Geometrical, mechanical, technological, metallographic, corrosion and physical indices have been studied. A correspondence of pipes of different manufacturers to stable high quality is established, in keeping with the basic and additional requirements of ASTM and EN standards that is achieved due to high quality metal and reproducibility of pipe manufacturing technology. 5 References, 3 Tables, 4 Figures.

Keywords: integrated approach, testing, stability, quality, pipe, weld, structure, property

Поступила в редакцию
23.12.2014



ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ ДИМОВИХ ТРУБ

В. Ю. ГЛУХОВСЬКИЙ

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

Високі димові труби, що експлуатуються промисловими підприємствами, відповідають категорії потенційно небезпечних, важкодоступних чи цілком недоступних об'єктів. Це обумовлює використання нетрадиційних методів технічної діагностики, насамперед тепловізійного неруйнівного контролю. Розглянуті найбільш розповсюджені типи димових труб, що експлуатуються вітчизняними підприємствами. Визначені основні дефекти для залізобетонного стовбуру, ізоляції та пароізоляції, а також футерівки димових труб. Розглянуті особливості стаціонарної теплопередачі через багатшарову цегляну стінку димової труби. Наведені основні етапи методики тепловізійного неруйнівного контролю димових труб з переліком основних температурних аномалій, яким відповідають дефекти в залежності від типу димових газів в трубі. Бібліогр. 2, табл. 4, рис. 2.

Ключові слова: високі димові труби, потенційно небезпечні, важкодоступні, цілком недоступні об'єкти, тепловізійний неруйнівний контроль, наскрізні дефекти

В сучасних галузях промисловості і будівництва експлуатується велика кількість потенційно небезпечних об'єктів, діагностика технічного стану яких звичайними методами неруйнівного контролю (НК) пов'язана з великими труднощами. Особливо це стосується важкодоступних або цілком недоступних об'єктів, що перебувають в неперервній експлуатації.

До перспективних методів діагностики технічного стану таких об'єктів відноситься тепловий метод, коли інформацію про параметри об'єкта несе температурне поле його поверхні, значення якого в основному визначається змінами теплофізичних, геометричних параметрів та параметрами навантаження [1].

В принципі будь-які об'єкти, експлуатація яких перш за все пов'язана зі зміною температурних режимів їх функціонування, можна діагностувати за допомогою теплового контролю (ТК).

На відміну від традиційних методів дефектоскопії об'єктів, що вимагають тимчасового виводу їх з експлуатації, ТК застосовують на об'єктах, що експлуатуються під робочими навантаженнями.

Для контролю технічного стану таких об'єктів переважно застосовують методи пасивного ТК без додаткового нагрівання або охолодження об'єкта контролю, коли його температурне поле змінюється за рахунок природних причин.

До потенційно небезпечних важкодоступних або недоступних об'єктів належать високі димові труби. Даний тип технічних споруд знаходиться під неперервною дією високотемпературних агресивних газових потоків і зовнішніх природних факторів, що знижують розрахований строк ек-

сплуатації димових труб. Серед причин, які викликають накопичення дефектів і зниження несучої здатності конструкцій, крім природного старіння якості будівельних матеріалів, найбільш важливими виступають багато- і малоциклічна втома, крихке руйнування та повзучість.

Димові та вентиляційні труби промислових підприємств – електростанцій, металургійних, нафтохімічних, газоперероблювальних та інших заводів – являють собою кінцеву ланку технологічних процесів, і виведення їх з експлуатації в багатьох випадках призводить до зупинки всього технологічного процесу.

Відмова в роботі димових труб напряму пов'язана з порушеннями режимів під час експлуатації, практично повній відсутності технічного нагляду, недооцінкою важливості проведення технічних діагностичних заходів. В той же час вихід з ладу димових труб може призвести не лише до зупинки виробництва, а й до великих економічних втрат. Нерідко проводиться технічний огляд димових труб, що знаходяться в передаварійному стані. При цьому навіть в таких умовах промислові підприємства дуже важко вирішують економічні проблеми.

Вивчення питання в області безпеки експлуатації і контролю стану димових труб дуже обмежене. Застосування з цією метою традиційних методів обстеження і моніторингу будівельних об'єктів потребує суттєвого коректування і обґрунтування, пов'язаних зі специфікою експлуатаційних умов об'єкту (низькі температури зовнішнього повітря, високотемпературні, хімічно агресивні газові потоки всередині труб, вібрація тощо). Офіційні методи оцінки фізичного стану функціонування димових труб без



зупинки технологічного процесу до даного часу не розроблені [2].

Димові труби в залежності від ступеня агресивності димових газів та їх об'єму, кліматичної зони та часу спорудження мають різну конструкцію. На рис. 1 наведені схеми фрагментів залізобетонних димових труб [3].

Всі труби таких конструкцій мають залізобетонний стовбур 1. Деякі конструкції труб включають футерівки 2 із глиняної цегли або із кислототривкої цегли 4. Між стовбуром труби та футерівкою прокладають паровологоізоляцію 3. В старих конструкціях залізобетонних труб використовували слизнік 5, прибудовували глиняну звичайну цеглу або будівельний легковаговик 6 та прокладали азбестовий шнур 7. В наступних конструкціях залізобетонних труб влаштовують повітряні зазори 8 для вентилявання, компенсатори 9 із азбесту та бітуму, а також повітряні канали 10 в зоні консолей стовбура. В останніх конструкціях залізобетонних труб футерівка 11 виконана із силікатполімербетону або полімербетону, а між стовбуром труби та футерівкою знаходиться металева роздільна діафрагма 12.

Основні дефекти димових труб є результатом низької якості будівництва та експлуатації в непроєктному режимі при зниженні об'єму та температури димових газів внаслідок наявності нещільностей по тракту котел–димова труба, порушень теплоізоляції і утворення конденсату, який руйнує будівельні матеріали.

Димові труби об'єктів металургії, енергетики та промислових підприємств будуються залізобетонними та цегляними. Характерні дефекти димових труб зі стовбурами із залізобетону та опис цих дефектів в залежності від важливості наведені в табл. 1–3.

Характерні дефекти димових труб із цегли: наскрізні та ненаскрізні вертикальні та горизонтальні тріщини; руйнування кладки в результаті попереозмінного заморожування та розморожування; порушення зчеплення цегли та розчину кладки від сірчаноокислої корозії; розкриття цегляної кладки (бочкоподібність) між бандажними поясами; деформація верхньої частини труби (нахил) в результаті сульфатації цегляної кладки.

Одним із найбільш розповсюджених дефектів димових труб з примусовою вентиляцією є закриття (засміченість) повітряного каналу або непрацююча (не змонтована) вентиляційна установка.

Розглянемо особливості стаціонарної теплопередачі через багатошарову цегляну стіну. В основі тепловізійної діагностики технічного стану конструкційних шарів димових труб та газоходів лежать процеси теплопередачі через циліндричні та плоскі стінки. На рис. 2 наведено принцип стаціонарної теплопередачі через багатошарову циліндричну стінку, в якості якої вибрана тришарова стінка.

Тепловий потік Q через циліндричну тришарову стінку можна визначити наступним чином [3]:

$$Q = \frac{T_r - T_{\text{п}}}{R}, \quad (1)$$

де T_r – температура гарячого газу в димовій трубі; $T_{\text{п}}$ – температура зовнішнього повітря; R – повний опір теплопередачі стовбура димової труби.

Опір R теплопередачі стовбура димової труби залежить від кількості шарів труби. Для тришарового стовбура димової труби величину опору теплопередачі можна визначити за формулою:

$$R = \frac{r_4}{r_1 \alpha_{\text{вн}}} + \frac{r_4}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_4}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_4}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{зв}}}, \quad (2)$$

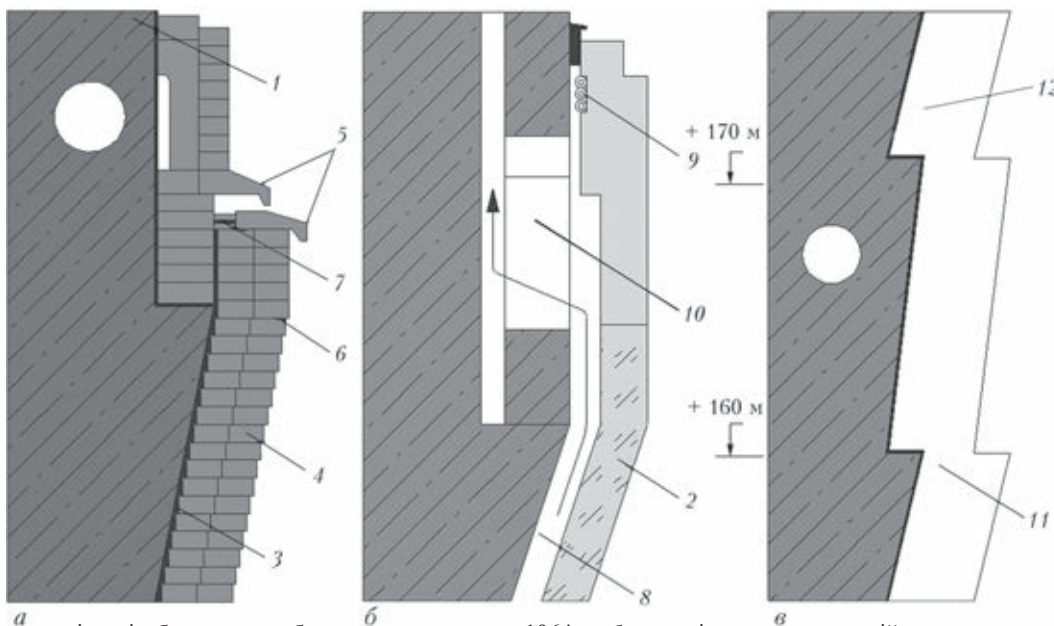


Рис. 1. Конструкції залізобетонних труб: а – споруджених до 1964 р.; б – з повітряним вентиляційним зазором; в – з монолітною футерівкою (позначення див. у тексті)



Таблиця 1. Характерні дефекти залізобетонного стовбура димових труб

Номер п/п	Найменування дефекту	Опис дефекту
1	Дефектний шов	Шов бетонування з наявністю великопористого бетону та раковин
2	Руйнівний шов	Шов бетонування з ознаками руйнування
3	Лущення поверхневого шару бетону	Руйнування поверхневого шару бетону до великого наповнювача
4	Тріщини	Тріщина на поверхні стовбура з одностороннім або наскрізним розкриттям
5	Глибоке та наскрізне руйнування стовбура	Руйнування бетону стовбура: відшарування великого наповнювача і арматури від бетону, наскрізні отвори
6	Відкол в бетоні	Здуття і відрив конусоподібного шматка бетону з утворенням заглибин у вигляді кратера
7	Відшарування та руйнування бетону	Поверхнєве руйнування бетону: відшарування шматками, відколи бетону з відкриттям арматури
8	Вологі ділянки бетону	Зволоження та обмерзання стовбура труби

Таблиця 2. Характерні дефекти теплоізоляції та паровологоізоляції димової труби

Номер п/п	Найменування дефекту	Опис дефекту
1	Руйнування теплової ізоляції (димова цегла, мінеральна вата)	Теплоізоляція з боку футерівки руйнується по товщині: перетворюється в масу білого кольору, місцями з жовтим нальотом; перетворюється в порошкоподібну масу
2	Руйнування паровологоізоляції	Паровологоізоляція стає крихкою та вміщує тріщини

Таблиця 3. Характерні дефекти футерівки димової труби

Номер п/п	Найменування дефекту	Опис дефекту
1	Деформація футерівки	Утворення опуклостей, випирання та бочкоподібне розшарування кладки
2	Руйнування футерівки	Повне або часткове руйнування, обвал футерівки з утворенням отворів
3	Корозія цегли футерівки	Відшарування цегли шматками
4	Тріщини	Вертикальні, горизонтальні або нахилені тріщини на поверхні футерівки з одностороннім або наскрізним розкриттям
5	Руйнування розчину кладки	Ослаблення міцності й зчеплення розчину кладки з цеглою; часткове або повне викришування й опадання розчину в швах кладки
6	Перекивання проміжку	Відсутність проміжку між футерівкою та стовбуром; зникає компенсаційний проміжок у вузлах скупчень окремих ланок

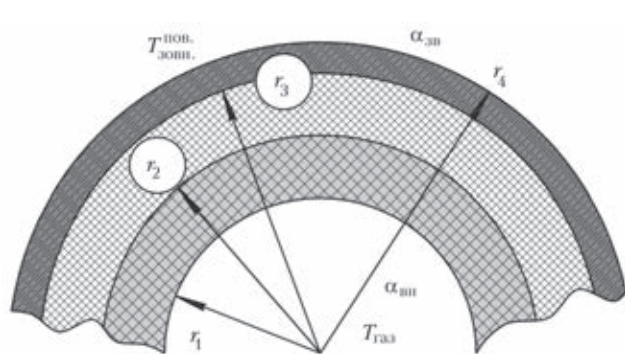


Рис. 2. Принцип стаціонарної теплопередачі через тришарову циліндричну стінку

де r_1 – внутрішній радіус стовбура труби; r_2 – r_4 – зовнішні радіуси відповідно першого, другого та третього шарів стовбура труби; $\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі першого шару стовбура труби; $\alpha_{зн}$ – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній стінці труби; λ_1 – λ_3 – коефіцієнти теплопровідності шарів стовбура труби.

Тепловий потік Q на внутрішній поверхні стінки стовбура труби можна визначити за виразом:

$$Q_{вн} = \alpha_{вн} (T_{газ} - T_{вн}), \quad (3)$$

де $T_{вн}$ – значення внутрішньої температури стінки стовбура труби; $\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі на внутрішній поверхні труби.

Відповідно величина теплового потоку труби буде дорівнювати:

$$Q_{зв} = \alpha_{зв} (T_{зв} - T_{п}), \quad (4)$$

де $\alpha_{зв}$ – коефіцієнт тепловіддачі на зовнішній стінці стовбура труби; $T_{зв}$ – зовнішня температура стінки стовбура труби.

Слід відмітити, що у формулі (1) тепловий потік визначено на одиницю площі зовнішньої поверхні димової труби.

Тепловізійну діагностику димових труб здійснюють з метою визначення їх технічного стану в процесі експлуатації, для прогнозування об'єму й місця виконання ремонту, а також для оцінки якості ремонтних робіт.

Обстеження димових труб виконують організації, що мають ліцензії, а оператори-термографісти повинні бути атестовані на рівень кваліфікації не нижче II.

Т а б л и ц я 4. Температурні аномалії та відповідні дефекти в залежності від типу димових газів в трубі

Номер п/п	Тип дефекту	Характер температурного розподілу		Примітки
		труба під розрідженням	труба під надлишковим тиском	
1	Дефектний шов бетонування	Горизонтальна холодна лінія	Горизонтальна тепла лінія	–
2	Тріщина несучого стовбура труби	Холодна лінія	Тепла лінія	Підтверджується при візуальному контролі
3	Наскрізна тріщина несучого стовбура труби	—»—	—»—	—»—
4	Зниження опору газопроникності матеріалу несучого стовбура	Холодна ділянка	Тепла ділянка	–
5	Руйнування несучого стовбура	В залежності від глибини руйнування – або холодна або тепла ділянка		Встановлюється при візуальному контролі
6	Корозія футерівки до 60 %	Тепла ділянка	Тепла ділянка	–
7	Обвал футерівки	—»—	—»—	–
8	Зниження опору газопроникності футерівки	—»—	—»—	–
9	Відсутність теплоізоляції в прошарку між стовбуром та футерівкою	—»—	—»—	–
10	Попелові відкладення	Холодна ділянка	Холодна ділянка	Уточнюється при проектуванні

Перевагами тепловізійного контролю обстеження димових труб та газоходів порівняно з візуальними методами є:

- можливість обстеження димових труб та газоходів без зупинки котлів;
- виявлення дефектів, які є прихованими від людського ока, наприклад, дефектів під шаром ізоляції та внутрішні дефекти;
- можливість класифікації дефектів за ступенем їх небезпеки для теплотехнічного стану димових труб та газоходів.

При тепловізійній діагностиці виявляються дефекти, що виникають на зовнішній поверхні зони аномально високої або низької температури. Ці зони виділяються дефектоскопістом на фоні середньої температури та природних шумів. Багато видів дефектів димових труб зводять до моделей наскрізних та ненаскрізних дефектів.

Наскрізні дефекти виникають у випадку сполучення стовбура або всіх шарів труби; особливо вони можуть виникати в місцях корозії арматури, кріпильних елементів і стикування конструктивно різних ділянок труби (слізниць, переходів бетонування, монтажних стиків). Даний вид дефектів є найбільш небезпечний, тому що призводить до пришвидшеного руйнування бетонного стовбура (арматури).

Наскрізні дефекти обумовлені руйнуванням матеріалу стінок стовбура або зміною їх товщини, що не супроводжується виникненням наскрізних дефектів. Ненаскрізні дефекти, що пов'язані зі зменшенням товщини швів, переважно супроводжуються локальним підвищенням температури на зовнішній поверхні труби. Відкладення попелу та локальне збільшення товщини шарів (збільшення товщини цегляної кладки або напли-

ви на бетонному стовбурі) викликають локальне зниження температури. Площі як теплої, так і холодної зони досить точно відповідають площі, що викликала дефект, а величина температурного сигналу залежить від виду та параметрів дефекту.

Тепловізійну зйомку проводять з 5–7 точок спостереження. В процесі зйомки вимірюють: температуру зовнішнього повітря на кожній точці спостереження; напрямок вітру; швидкість вітру.

Обмеження тепловізійного методу для діагностики димових труб пов'язані:

- з труднощами розшифрування інфрачервоних зображень та їх прив'язки до специфічних видів дефектів;

- з труднощами огляду верхньої частини труби внаслідок обмеженого кута зору та крутого кута огляду (усувається віддаленням від труби та застосуванням далекофокусної оптики);

- з впливом сонячного засвічування (нагрівання ділянок труби та відбита радіація); усувається правильним вибором часу огляду (уранці; пізно ввечері або у похмурий день).

Під час підготовки звіту за результатами тепловізійної діагностики технічного стану димової труби використовують як окремі, так і панорамні термограми, для чого в останньому випадку окремі термограми «зшивають» за допомогою засобів комп'ютерної графіки. За допомогою термографічної діагностики можна оцінити якість косметичного ремонту, який може виглядати задовільним при візуальному огляді димової труби.

Основним результатом тепловізійної діагностики димових труб є карта дефектів, яка складається на базі комп'ютерного моделювання та обробки панорамних термограм з урахуванням ре-



зультатів візуального огляду у відповідності з вимогами відповідних нормативних документів.

Під час проведення тепловізійної діагностики димових труб треба знати режими їх роботи, тому що дефекти труб в залежності від режимів їх роботи можуть давати на термограмах різні види поверхневих температурних аномалій. Тому в тепловізійній діагностиці димових труб необхідно враховувати накопичений досвід, який отримано шляхом фіксування термограм, що відповідають різним видам поверхневих температурних аномалій на зовнішній поверхні стовбура труби. В табл. 4 наведені характеристики температурних аномалій від дефектів різного типу в залежності від того, працює труба під розрідженим чи надлишковим тиском.

Висновки

Високі димові труби промислових підприємств – електростанцій, металургійних, нафтохімічних, газоперероблювальних та інших заводів – являють собою кінцеву ланку технологічних процесів, і виведення їх з експлуатації в багатьох випадках призводить до зупинки всього технологічного процесу. Даний тип промислових об'єктів належить до категорії потенційно небезпечних, важкодоступних або цілком недоступних об'єктів, що змушує застосовувати нетрадиційні методи неруй-

нівного контролю, а саме тепловізійну дистанційну діагностику.

Розглянуто найбільш розповсюджені типи димових труб, що експлуатуються вітчизняним промисловим комплексом. Визначені основні дефекти для залізобетонного стовбура, теплоізоляції та паровологоізоляції, а також футерівки димових труб.

Розглянуто особливості стаціонарної теплопередачі через багат шарову цегляну стіну димової труби. В основі тепловізійної діагностики технічного стану конструкційних шарів димових труб та газоходів лежать процеси теплопередачі через циліндричні та плоскі стінки, що уможливорює застосування тепловізійного неруйнівного контролю для визначення технічного стану даних технічних об'єктів.

Наведені основні етапи методики тепловізійного неруйнівного контролю димових труб з наведенням основних температурних аномалій, яким відповідають дефекти в залежності від типу димових газів в трубі.

1. Маслова В. А., Стороженко В. А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Харьков: Компания «СМИТ», 2004. – 160 с.
2. Яблонько Е. В. Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб // Молодой ученый. – 2011. – № 9. – С. 65–68.
3. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 76 с.

High-altitude chimneys that are operated by industrial enterprises are in the category of potentially hazardous, difficult-of-access or totally inaccessible facilities. This necessitates the application of nontraditional methods of technical diagnostics, first of all thermovision nondestructive testing. The paper considers the most common types of chimneys that are operated by domestic enterprises. The main defects for the concrete column, insulation and vapour insulation, as well as chimney lining, have been determined. Features of stationary heat transfer through the chimney multilayer brick wall are considered. Main stages of the procedure of thermovision nondestructive testing of chimneys are given, with a list of main temperature anomalies, to which defects correspond, depending on the type of flue gases in the chimney. 2 References, 4 Tables, 2 Figures.

Keywords: high altitude chimneys, potentially hazardous, difficult-of-access, or totally inaccessible facilities, thermovision nondestructive testing, through-thickness defects

Надійшла до редакції
14.10.2014

НОВА КНИГА

Н. І. Бурау, О. В. Зажичський. Розпізнавання технічного стану об'єктів на основі штучних нейронних мереж. – Київ.: Нац. авіац. ун-т, 2014. – 112 с.

У монографії наведено результати досліджень можливості використання штучних нейронних мереж для розпізнавання технічного стану роторних елементів авіаційних двигунів у процесі віброакустичної діагностики на стаціонарних та перехідних режимах експлуатації за чисельними діагностичними ознаками та ознаками у вигляді контурних зображень.

Монографія містить аналіз традиційних методів розпізнавання стану об'єктів діагностики, характеристику нейронних мереж для їх застосування в задачах розпізнавання образів, результати синтезу нейромережевих класифікаторів на основі імовірносної нейронної мережі та мережі адаптивної резонансної теорії, результати розпізнавання та аналіз ефективності розпізнавання стану лопаток авіаційних двигунів розробленими класифікаторами. На думку авторів, виявлення особливостей застосування нейронних мереж для двокласової діагностики за чисельними діагностичними ознаками та ознаками у вигляді контурних зображень, встановлення характеру впливу характерних параметрів нейронних мереж та особливостей їх навчання на точність класифікації сприятиме розвитку методів функціональної технічної діагностики. А широке впровадження сучасної елементної бази на основі цифрової техніки, сучасних мікроконтролерів розширить можливості практичного застосування нейромережевих класифікаторів та сприятиме створенню нових перспективних систем моніторингу технічного стану складних динамічних об'єктів.

Книга призначена для фахівців у галузі контролю та діагностики авіаційної техніки, наукових працівників, аспірантів та студентів старших курсів вищих навчальних закладів.



РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ «ПОЛИСКАН»

С. Я. ЯЦЕНКО, Ю. Я. КОКОРОВЕЦ, А. П. ЛОЗЕНКО, В. И. ПЕТРЕНКО, Н. А. ШУМЕЙКО
НТ СКБ «ПОЛИСВИТ» филиал ГНПП «Объединение «Коммунар». 61070, г. Харьков, ул. Рудика, 1.
E-mail: seb@polisvit.kharkov.ua

Приведено состояние разработки и производства отечественных рентгенотелевизионных систем серии «Полискан», которые предназначены для таможенного контроля различных объектов, контроля поступающей корреспонденции предприятий, учреждений и организаций, контроля личных вещей посетителей государственных учреждений, неразрушающего контроля качества продукции промышленных предприятий. Как показывает опыт эксплуатации систем «Полискан», они по своим техническим характеристикам не уступают зарубежным аналогам. Библиогр. 8, рис. 3, табл. 2.

Ключевые слова: безопасность, неразрушающий контроль качества, таможенный контроль, рентгенотелевизионная система

Глобализация мировой экономики приводит к росту объемов товарооборота между государствами, а географическое положение Украины обуславливает прохождение через ее территорию кратчайших транспортных путей между Европой и Азией. Вместе с тем рост активности террористических организаций и транснациональных наркокартелей требует усиления контроля за перемещаемыми товарами и транспортными средствами через государственную границу Украины. Как показывает опыт мировой таможенной практики, оперативное и эффективное обнаружение контрабанды, в том числе оружия и взрывчатых веществ, обеспечивается за счет использования технических средств таможенного контроля. Эффективными техническими средствами в настоящее время являются рентгенотелевизионные системы (РТС) и инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК).

Функционирование РТС основано на методе цифровой радиографии, который предусматривает использование многоканального приемно-детектирующего тракта с низким уровнем шумов, аналогово-цифровое преобразование сигналов, ввод информации в ПЭВМ, обработку информации и построение теневого изображения объекта контроля. Преимуществами метода цифровой радиографии является получение в реальном времени теневого изображения объекта контроля, компьютерная обработка изображения современными программными средствами, протоколирование и архивация результатов контроля.

Харьковское Государственное научно-производственное предприятие «Объединение «Коммунар» является единственным предприятием в Украине, которое с 1996 г. по заказу Государственной таможенной службы Украины в рамках ее многоотраслевой научно-технической программы развития разработало РТС серии «Полискан» для таможенного контроля различных

объектов: от почтовых отправок до морских контейнеров и автофургонов [1–5]. Наибольшее распространение получили системы транспортерного типа «Полискан-4» и «Полискан-5», на основе которых разработаны унифицированные системы «Полискан-4530», «Полискан-6143», «Полискан-75100» и «Полискан-100100» (табл. 1, рис. 1).

Как показывает опыт эксплуатации систем «Полискан» в таможенных органах Украины и их экспонирования на ежегодных специализированных выставках по безопасности, эти системы не уступают зарубежным аналогам. В отличие от зарубежных поставщиков, «Объединение «Коммунар» самостоятельно выполняет все работы по введению систем «Полискан» в эксплуатацию и их техническому обслуживанию.

Необходимо отметить, что рассмотренные выше РТС «Полискан» транспортерного типа являются стационарными и размещаются при эксплуатации в служебных помещениях.

Для выполнения контроля различных объектов в нестационарных, а иногда и в поле-



Рис. 1. Внешний вид РТС «Полискан-6143»

Таблица 1. Основные технические характеристики РТС

Параметр	Полискан-4530	Полискан-6143	Полискан-75100	Полискан-100100
Размеры контролируемого объекта, мм	420×270	580×400	600×900	1000×1000
Высота транспортера, мм	700	750	300	300
Грузоподъемность транспортера, кг	60	140	160	200
Проникающая способность (сталь), мм	10	30	30	30
Обнаруживающая способность, мм	0,08	0,08	0,08	0,08

вых условиях разработаны переносные системы «Полискан-3030П», «Полискан-4040П», «Полискан-5050П». В первую очередь данные системы предназначены для оперативного контроля содержимого подозрительных объектов с целью выявления опасных и запрещенных вложений для обеспечения безопасности. При этом контроль подозрительного объекта проводится без его перемещения с места расположения. Потребителями систем «Полискан» могут быть Министерство чрезвычайных ситуаций Украины, Министерство внутренних дел Украины, Служба безопасности Украины, Государственная служба охраны и другие службы, обеспечивающие безопасность.

Переносные РТС «Полискан» разработаны по модульному принципу и состоят из блока преобразования рентгеновского излучения, рентгеновского излучателя и ноутбука. Управление составными частями системы выполняется с помощью ноутбука по кабельной или беспроводной линии связи. Блок преобразования, в отличие от известных РТС на базе сцинтилляционного монокристаллического экрана [6], построен на основе двухэнергетической линейки детекторов рентгеновского излучения. Линейка детекторов перемещается с помощью прецизионного линейного механизма перемещения, обеспечивая сканирование контролируемого объекта. Данная реализация РТС обеспечивает большую площадь контроля, а также позволяет выполнять идентификацию материалов в контролируемом объекте, что особенно важно для обнаруже-

ния взрывчатых веществ и выбора способа по их обезвреживанию (табл. 2, рис. 2).

Системы обеспечивают получение теневого рентгеновского изображения объекта контроля с распознаванием групп веществ по эффективным атомным номерам [4, 7] и отображением их соответствующими цветами на экране монитора: с низкими номерами (группа органических веществ) – оранжевым; со средними (группа смешанных веществ) – зеленым; с высокими (группа неорганических веществ) – синим.

Черным цветом отображаются неидентифицируемые вещества.

Системы обеспечивают: индикацию даты, времени, номера объекта контроля и режима работы; автоматическое выделение на экране участков проверяемых объектов, которые полностью поглощают рентгеновское излучение; тестирование блоков и функциональных узлов; автоматическое включение рентгеновского излучения в момент начала движения сканирующей линейки; сканирование контролируемого объекта при движении сканирующей линейки в двух направлениях – прямом и реверсном и вывод теневого изображения объекта на монитор; автоматическое выключение рентгеновского излучения при остановке сканирующей линейки; двух- и четырехкратное увеличение выбранного участка изображения; отображение черно-белого изображения в позитиве и негативе; повторный просмотр пяти последних изображений проверяемых объектов; выделение контура предметов проверяемого объекта; детализацию изображения в зависимости от плотности веществ в объекте контроля; формирование архива изображений проверяемых объектов и чтение из архива изображений ранее проверенных объектов; возможность работы в локальной сети.

На рис. 3 приведены результаты контроля объекта, в котором содержатся гранаты. Сканирование объекта выполнялось при испытаниях системы в Научно-исследовательском экспертно-криминалистическом центре ГУ МВД Украины в Харьковской области.

На базе отдельных приборов, входящих в состав РТС серии «Полискан» для таможенного контроля, созданы и внедрены технические средства для НК качества продукции промышленных пред-



Рис. 2. Внешний вид переносной РТС «Полискан-3030П»



Таблица 2. Основные технические характеристики переносных РТС

Параметр	Полискан-3030П	Полискан-4040П	Полискан-5050П
Поле сканирования (ширина × высота), мм, не менее	350×300	400×400	500×500
Проникающая способность (сталь), мм	25	25	25
Обнаруживающая способность, мм	0,08	0,08	0,08
Диапазон изменения анодного напряжения рентгеновской трубки, кВ	65...160	65...160	65...160
Диапазон изменения анодного тока рентгеновской трубки, мА	0,1...1,0	0,1...1,0	0,1...1,0
Минимальное время непрерывной работы блоков системы от аккумуляторных батарей в режиме сканирования, мин	30	30	30
Максимальное расстояние между блоками и ноутбуком при кабельном подключении, м	50	50	50
Максимальное расстояние между блоками и ноутбуком при беспроводном подключении (при прямой видимости и отсутствии радиопомех), м	100	100	100

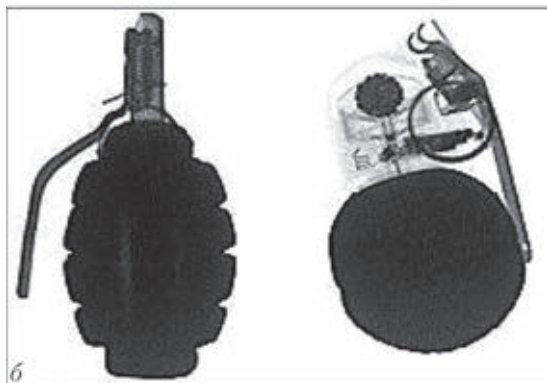
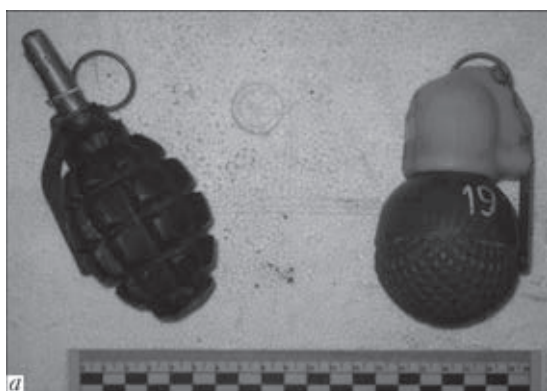


Рис. 3. Фотография (а) и теневое изображение контролируемого объекта (б)

приятый, в частности, конструктивных элементов ракетно-космической техники [8].

Выводы

Для многих промышленных предприятий НК качества продукции на различных этапах ее производства является актуальной задачей. Рентгенов-

ские средства НК не имеют альтернативы в тех случаях, если параметрами контроля качества изделий являются внутренние геометрические размеры составных частей изделий, пространственное расположение внутренних деталей, структура материалов и наполнителей, наличие примесей, раковин или трещин.

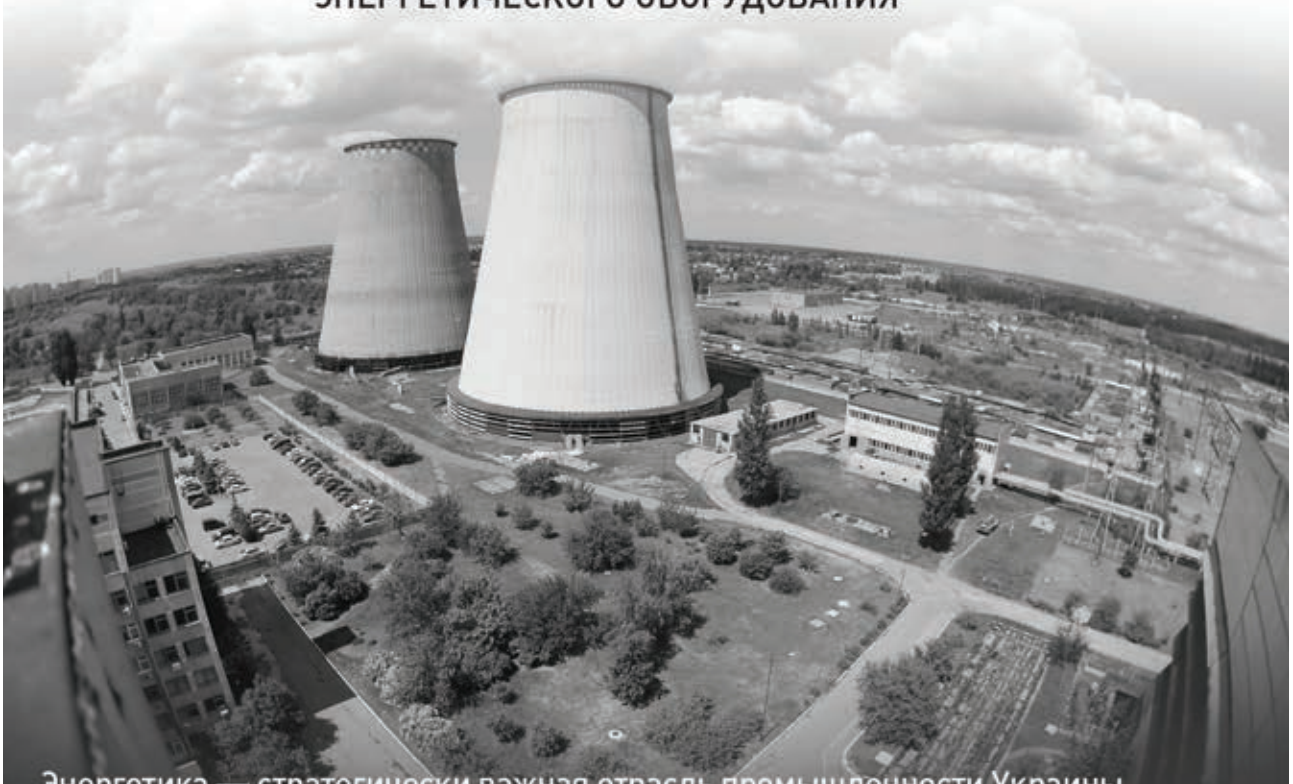
1. *Технические* и программные средства систем таможенного досмотра «Полискан» / В.М. Свищ, В.В. Байбиков, Н.А. Шумейко и др. // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2000. – Вип. 5. – С. 167–172.
2. *Свищ В. М.* Разработка и производство рентгеноинтроскопических систем таможенного контроля семейства «Полискан» // Наука – производству. – 2002. – № 1(51). – С. 5–8.
3. *Кожокар И. Г., Шумейко Н. А.* Программное обеспечение рентгеноинтроскопических систем таможенного контроля семейства «Полискан» // Там же. – 2002. – № 1(51). – С. 15–17.
4. *Сцинтилляционные материалы.* Инженерия, устройства, применение. – Харьков: ИСМА, 2009. – 332 с.
5. *Рентгенографический комплекс для контроля содержимого морских контейнеров и большегрузных автомобилей «Полискан-3»* / В.М. Белугин, В.В. Ветров, В.В. Елян и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1(489). – С. 11–19.
6. *Троцкий В. А.* Портативная рентгенотелевизионная система // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – № 3. – С. 48–52.
7. *Идентификация веществ в рентгеноинтроскопических системах таможенного контроля* // Мат. 14 Междунар. конф. «Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий. ЛЕО-ТЕСТ-2009» / П.Н. Егоров, Н.А. Шумейко, В.И. Петренко и др. – С. 73–74.
8. *Про один метод малоракурсної індустріальної рентгеновської комп'ютерної томографії* / С.Я. Яценко, О.М. Литвин, М.А. Шумейко и др. // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. – 2008. – Вип. 13. – 288 с.

State-of-the art of development and manufacturing of domestic X-ray TV systems of Polyscan series, designed for customs inspection of various facilities, checking incoming mail of enterprises, institutions and organizations, monitoring personal belongings of state institution visitors, nondestructive quality testing of industrial enterprise products. As shown by experience of Polyscan system operation, they are not inferior to foreign analogs as to their performance. 8 References, 3 Figures, 2 Tables.

Поступила в редакцию
11.12.2014

ЭФФЕКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ —
СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Энергетика — стратегически важная отрасль промышленности Украины, однако большая часть существующих объектов энергетики построена еще в СССР, и в настоящее время нуждается в серьезной модернизации. Одна из приоритетных научно-технических задач в отрасли — продление ресурса оборудования и вывод его из эксплуатации по фактическому состоянию. Эффективным средством решения этой задачи является создание информационно-измерительных систем непрерывного мониторинга, позволяющих контролировать работоспособность оборудования непосредственно в процессе эксплуатации с оценкой его фактического состояния. Современное развитие средств вычислительной техники, радиоэлектроники, прикладной математики, техники испытаний, науки о прочности материалов и механики сплошной среды позволяют решить эту задачу на достаточно высоком уровне.

Статья, посвященная разработке и внедрению систем непрерывного мониторинга на тепловых станциях, будет опубликована в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», №2, 2015

ПОДПИСКА — 2015

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



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

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 2015 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2013 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках 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 18.03.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
 Печать ООО «Фирма «Эссе».
 03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.