

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

Интервью с заместителем директора ИЭС им. Е.О. Патона
НАН Украины академиком Л.М. Лобановым 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**ЛОБАНОВ Л.М., НЕХОТЯЩИЙ В.А., ПАЛИЕНКО А.Л.,
БЕЗЛЮДЬКО Г.Я.** Исследование деформационного воздей-
ствия на стали 08X18H9 и 12X18H10T в сварных сосудах и трубах..... 7

НЕДОСЕКА С.А., НЕДОСЕКА А.Я. Возникновение трещин на
внутренней поверхности трубопроводов в условиях эксплу-
атации при высоких температурах. Сообщение 1. Тепловые
нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации..... 11

УЧАНІН В.М. Селективне виявлення дефектів у тонкостінних
виробках із аустенітних сталей накладним вихвострумним
перетворювачем 15

**НЕДОСЕКА С.А., ОВСИЕНКО М.А., ХАРЧЕНКО Л.Ф.,
ЯРЕМЕНКО М.А.** Оптимизация размещения датчиков
и повышение точности локации источников акустической эмиссии..... 18

ЮХИМЕЦ П.С. Оценка остаточного ресурса поврежденного
тройника 26

**ПОХМУРСЬКИЙ В.І., КОШОВИЙ В.В., СТУДЕНТ М.М.,
РОМАНИШИН Р.І., РОМАНИШИН І.М., ГВОЗДЕЦЬКИЙ В.М.,
СЕМАК П.М., ШАРАМАГА Р.В.** Картографування адгезійної
міцності газотермічного покриття на основі реєстрації
зворотньо-розсіяного УЗ сигналу..... 32

СЛАВКОВ В.М., ДАВИДЕНКО О.П. Тепловий неруйнівний
контроль та спосіб формування теплових полів на металевих
пластинах 39

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

РЫЖИКОВ В.Д., ОПОЛОНИН А.Д. Влияние рассеянного
излучения на сигналы детекторов цифровой радиографической
системы 46

**КАЗАКЕВИЧ М.Л., СЕМЕНЕЦ А.И., ДЕРЕЧА В.Я.,
КАЗАКЕВИЧ В.М.** Современные задачи диагностирования
технического состояния авиационной техники методом
проникающих веществ..... 49

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

БИЛОКУР І.П., МЕДВЕДЕВА Н.А., РАДЬКО О.В. Принципи
практичної підготовки персоналу з неруйнівного контролю 52

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Дни неразрушающего контроля в Болгарии 57

Международный форум по механике в Польше 59

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

Interview with Deputy Director of the E. O. Paton Electric Welding
 Institute Prof. L.M. Lobanov 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

LOBANOV L.M., NEKHOTYASHCHII V.A., PALIENKO A.L.,
BEZLYUDKO G.Ya. Investigation of deformational impact on
 08Kh18N9 and 12Kh18N10T steels in welded vessels and pipes 7

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya. Crack initiation on inner
 surface of piping at high temperatures. Information 1. Thermal load
 on pipe walls at starting and in service 11

UCHANIN V.M., Selective detection of defects in thin-walled items
 from austenitic steels by put-on eddy current transducer 15

NEDOSEKA S.A., OVSIENKO M.A., KHARCHENKO L.F.,
YAREMENKO M.A. Optimization of sensor placing and
 improvement of accuracy of location of acoustic emission sources..... 18

YUKHIMETS P.S. Evaluation of residual life of a damaged T-joint..... 26

POKHMURSKII V.I., KOSHOVOJ V.V., STUDENT M.M.,
ROMANISHIN R.I., ROMANISHIN I.M., GVOZDETSKII V.M.,
SEMAK P.M., SHARAMAGA R.V. Mapping of adhesion
 strength of thermally-sprayed coating based on recording
 back-scattered US signal..... 32

SLAVKOV V.M., DAVIDENKO O.P. Thermal non-destructive
 testing and method of formation of thermal fields on metal plates..... 39

INDUSTRIAL

RYZHIKOV V.D., OPOLONIN A.D. Influence of scattered radiation
 on signals of digital radiographic system detectors 46

KAZAKEVICH M.L., SEMENETS A.I., DERECHA V.YA.,
KASAKEVICH V.M. Modern tasks of diagnostics of technical
 condition of aviation equipment by penetrant inspection 49

STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

BILOKUR I.P., MEDVEDEVA N.A., RADKO O.V.
 Principles of practical training of NDT personnel 52

NEWS AND INFORMATION

Days of nondestructive testing in Bulgaria..... 57

International Forum on mechanics in Poland..... 59

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

Интервью с заместителем директора ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины академиком Л.М. Лобановым

На протяжении всего периода деятельности Института электросварки им. Е.О. Патона большое внимание уделяется созданию высокоэффективных сварных конструкций. В настоящее время это направление работ возглавляет академик НАН Украины, заслуженный деятель науки и техники Украины Леонид Михайлович Лобанов. Его научная деятельность связана с фундаментальными и прикладными исследованиями в области материаловедения, прочности материалов и сварных конструкций. Его труды посвящены исследованиям поведения материалов при сварке, развитию теории сварочных напряжений и деформаций, разработке методов исследования и регулирования напряженно-деформированных состояний сварных соединений, созданию сварных конструкций новой техники, разработке методов и средств их неразрушающего контроля и диагностики.

Исследования и разработки, выполненные Л.М. Лобановым и возглавляемым им коллективом отмечены:

1981 г. — Премия Совета Министров СССР за разработку и внедрение новых физических методов исследования и совершенствования металлургических процессов и конструкций новой техники;

1994 г. — Государственная премия Украины в области науки и техники за цикл научных работ в области теории расчетов пространственных конструкций и сооружений на статические и динамические нагрузки;

2004 г. — Премия им. Е.О. Патона за цикл работ в области прочности, диагностики и продления ресурса сварных конструкций.

Л.М. Лобанов опубликовал свыше 700 научных трудов, включая 80 авторских свидетельств и патентов. Он подготовил 9 докторов и 16 кандидатов технических наук. Награжден орденами «За заслуги» I, II и III степени, а также Орденом «Знак почета», отмечен наградой НАН Украины «За научные достижения».

В канун 75-летия со дня рождения Л.М. Лобанова редакция журнала взяла у юбиляра интервью, касающееся направлений его деятельности.



Леонид Михайлович, многие ученые и специалисты в Украине и за рубежом знакомы с Вашими публикациями по теме создания экономичных сварных конструкций, контроле их качества и повышения надежности. Каковы истоки появления у Вас интереса к этому направлению?

Создание экономичных, надежных и долговечных сварных конструкций, работающих на земле и под водой, при нормальных, высоких и низких температурах, в различных экстремальных условиях эксплуатации является важной научно-технической проблемой. Большой вклад в ее решение внесли ученые и специалисты Института электросварки им.

Е.О. Патона НАН Украины. Обладая большими знаниями и неординарной инженерной интуицией, основатель нашего института Евгений Оскарович Патон определил основные направления работ, связанных с созданием надежных и экономичных сварных конструкций. Они предусматривают комплексное решение исследовательских, материаловедческих, конструкторских и технологических задач. Такой подход получил широкое развитие благодаря деятельности его учеников и последователей. Исследования и разработки, проведенные в ИЭС, дали возможность изготавливать рациональные сварные конструкции при высоком уровне автоматизации и механизации сварочных работ. При этом основные объемы сварочных работ переносятся в заводские условия, что обеспечивает значительный рост производительности сварочных процессов и повышение качества сварных соединений.

Какие актуальные задачи в отмеченной области необходимо решать сегодня?

В настоящее время выполняется комплекс новых исследований по оценке статической и циклической прочности сварных соединений с учетом их механической неоднородности и наличия трещиноподобных дефектов, сопротивления сварных соединений хрупким и слоистым разрушениям, по разработке научных подходов к обеспечению надежности и долговечности сварных конструкций при выполнении требований по снижению их металлоемкости, создании технологий упрочняющих обработок сварных соединений, применении математических методов исследования термомеханических процессов при сварке, широком применении средств неразрушающего контроля и технической диагностики сварных соединений и конструкций. Создаются новые типы высокоэффективных сварных конструкций, в том числе строительные металлоконструкции, пролетные строения мостов, тяжелонагруженные конструкции из высокопрочных сталей для горнодобывающей техники и железнодорожного транспорта.

Какие практические примеры воплощения в жизнь в последние годы разработок ИЭС в области сварных конструкций?

Следует отметить сооружение в Киеве Национального спортивного комплекса «Олимпийский» перед проведением европейского футбольного чемпионата ЕВРО-2012. Коллективом ИЭС были разработаны и внедрены технологии сварки несущих металлоконструкций этого уникального комплекса.



Проведено научно-технологическое сопровождение сборочно-сварочных работ в заводских условиях, а также непосредственно на строительной площадке. Аналогичные работы были выполнены при сооружении Международного выставочного центра на Броварском шоссе в г. Киеве.

Внедрены новые стали С390-С690 в производство сварных конструкций и с их применением создан ряд уникальных инженерных сооружений, среди которых резервуары для хранения нефти вместимостью 50 и 75 тыс. т, пролетные строения Подольского мостового перехода и Чабанского моста в г. Киеве. Сотрудники ИЭС приняли активное участие в строительстве Дарницкого железнодорожно-автомобильного моста в г. Киеве и участвуют в строительстве Запорожского мостового перехода. Выполнено научно-техническое сопровождение сборочно-сварочных работ при монтаже металлоконструкций крыши из алюминиевого сплава терминала «Д» в аэропорту Борисполь. Большой опыт исследований и разработок ИЭС в области проектирования и изготовления различных типов строительных конструкций, определения их технического состояния и реконструкции обобщен в трехтомном издании «Сварные строительные конструкции».

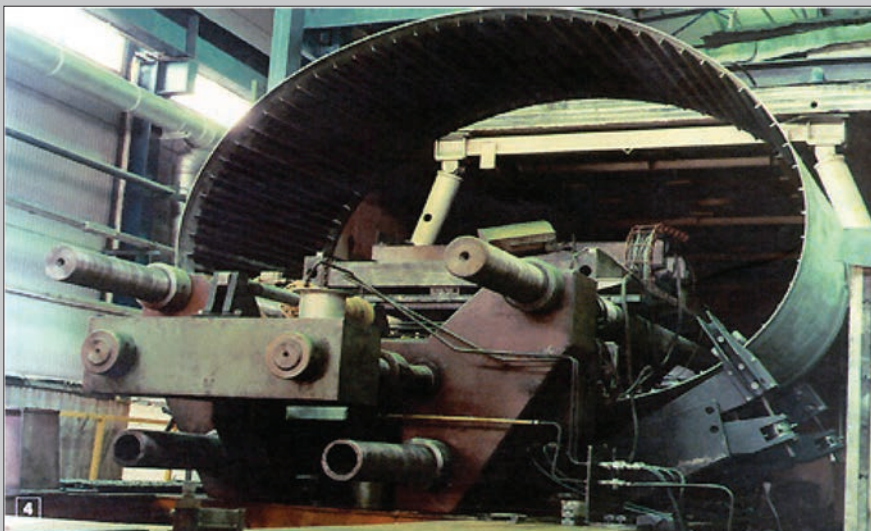
Леонид Михайлович, в Ваших публикациях часто употребляется понятие «бездеформационная сварка конструкций». Не могли бы Вы пояснить в чем заключается такой подход при производстве конструкций?

Благодаря нашим разработкам сформировано новое научно-техническое направление — бездеформационная сварка конструкций, которое базируется на создании предварительных перед сваркой напряженно-деформированных состояний, оптимизированных по отношению к свароч-

ным напряжениям и деформациям. Для всех типов сварных соединений разработаны способы определения оптимальных параметров предварительных напряженно-деформированных состояний, которые позволяют устранить остаточные сварочные деформации. Такой подход включает также применение сборочно-сварочных агрегатов, которые объединяют деформирующие системы, оборудование для механической обработки свариваемых кромок в условиях заданного нагружения и специализированную сварочную аппаратуру.

Назовите, пожалуйста, примеры его использования.

Он реализован на предприятиях ракетно-космической и авиационной промышленности при изготовлении тонколистовых конструкций из легких сплавов, к которым предъявляются высокие требования точности геометрических размеров и качества соединений. Уникальные установки были поставлены по контрактам предприятиям Китайской народной республики. В настоящее время заключен договор с КБ «Южное» на разработку технологии бездеформационной сварки стрингерных панелей, а в дальнейшем и стрингерных оболочек из высокопрочного алюминиевого сплава.



Каким новым методам неразрушающего контроля Вы бы отдали предпочтение?

Сделан значительный вклад в создание систем диагностики изделий космической и авиационной техники. Разработан диагностический метод электронной широкографии, который основан на применении лазерной аппаратуры и компьютерной обработки оптической информации. Его существенным преимуществом являются бесконтактность измерений и возможность осуществлять в реальном масштабе времени неразрушающий контроль качества объектов как из металлических, так и композиционных материалов. Разработанная технология диагностики и широкографическая аппаратура внедрены в КБ «Южное». Исследования, проведенные по заказу ГП «АНТОНОВ» на образцах обшивки самолета, показали, что методом электронной широкографии выявляются коррозионные повреждения элементов фюзеляжа и крыла самолета без демонтажа облицовки и герметика.

На основе применения способа электронной спекл-интерферометрии созданы технология и портативный прибор для определения остаточных напряжений в сварных соединениях конструкций новой техники. Конкурс, проведенный Международным институтом сварки, подтвердил, что разработанный в ИЭС метод и аппаратура для его реализации обеспечивают достоверную оценку локальных особенностей остаточного напряженного состояния сварных соединений. Эта методология и оборудование эффективно используются в лабораторной практике ИЭС и поставлены по контрактам различным промышленным и исследовательским организациям дальнего зарубежья.

Леонид Михайлович, известно, что в последние десятилетия Вы много сил и энергии отдаете проблеме остаточного ресурса длительно работающих конструкций и сооружений. Каким образом организована работа в этом направлении в Украине?

Во многих странах прослеживается тенденция исчерпания нормативных сроков эксплуатации большого количества конструкций, сооружений, инженерных систем. Особое значение эта проблема приобрела в Украине. Вследствие сложных экономических условий большинство субъектов хозяйственной деятельности практически прекратили обновление основных фондов. В этой



связи вопросы безопасности функционирования ответственных объектов промышленности, энергетики, транспорта, строительства становятся с каждым годом все более актуальными. Важными являются задачи, связанные с управлением эксплуатационной надежностью и долговечностью таких объектов путем определения их технического состояния и остаточного ресурса, установления научно обоснованных сроков и регламентов эксплуатации.

Решению этих задач посвящена целевая комплексная программа НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин», которая выполняется с 2004 г. Научным руководителем программы является академик Борис Евгеньевич Патон. Цель программы — разработка методологических основ прогнозирования остаточного ресурса, создание методов, технических средств и технологий для оценки технического состояния и продления сроков эксплуатации техногенно и экологически опасных объектов.

Проекты программы направлены на выполнение таких важных заданий, как развитие методов и средств неразрушающего контроля качества и технической диагностики конструкций; создание систем непрерывного мониторинга ответственных объектов длительной эксплуатации с использованием современных информационных технологий; разработка способов прогнозирования остаточного ресурса конструкций с повреждениями и технологий восстановления их работоспособности; создание эффективных методов, механических средств и технологий для оценки и продления ресурса оборудования тепловой и атомной энергетики, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, нефте- и газопроводов, авиакосмической техники, а также мостов, строительных и транспортных конструкций; подготовка нормативных документов, научно-технических справочников и пособий по вопросам оценки и продления ресурса объектов длительной эксплуатации.

Есть ли положительные результаты выполнения работ по программе «Ресурс»?

В процессе выполнения проектов программы получены значительные научно-технические и практические результаты. Так, внедрены акустико-эмиссионные системы для непрерывной диагностики компонентов оборудования на Одесском припортовом заводе и теплоцентрали «Киевэнерго», создана аппаратура для бесконтактного измерения износа поверхностей железнодорожных рельсов, разработана методология низкочастотного ультразвукового контроля повреждений в труднодоступных участках трубопроводов, разработаны технология и оборудование для формирования усиливающих конструкций с применением металлополимерной провололочной муфты для ремонта локальных дефектов нефте- и газопроводов без остановки транспорта продуктов, восстановлены уникальные промышленные изделия и пролетные строения железнодорожных мостов, созданы современные стандарты и нормативные документы для инженерной практики и многое другое.

Основные результаты работ по каждому проекту программы обобщаются в итоговых сборниках статей, которые издаются институтом каждые три года. Специалисты считают эти сборники энциклопедией по вопросам ресурса. Они являются важным вкладом в формирование научно-технического аспекта инженерной культуры в нашей стране и предоставляют новый инструментарий в решении проблем ресурса безопасной эксплуатации конструкций и оборудования.

Благодарим Вас, Леонид Михайлович, за интересное и обстоятельное освещение проблем, связанных с созданием современных сварных конструкций и желаем Вам крепкого здоровья и новых достижений на благо Украины.

Редакция журнала



ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТАЛИ 08X18H9 И 12X18H10T В СВАРНЫХ СОСУДАХ И ТРУБАХ

Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. А. НЕХОТЯЩИЙ¹, А. Л. ПАЛИЕНКО¹, Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО²

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

²ООО «Специальные Научные Разработки». 61184, а/я 12036. E-mail: mail@snr-ndt.com

Приведены результаты исследования процесса возникновения и наращивания магнитных свойств аустенитных сталей 08X18H9 и 12X18H10T в процессе стендового нагружения образцов внутренним гидравлическим давлением в статистическом режиме. Это открывает перспективу для осуществления практической диагностики текущего состояния конструкций и оборудования из аустенитных сталей, включая и сварные соединения в них. Библиогр 6, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: аустенитная сталь, ферромагнитная фаза с ОЦК-решеткой, диагностика, сварные конструкции, коэрцитивная сила

Известно, что внешнее воздействие (деформационное, температурное) оказывает заметное влияние на магнитные свойства аустенитных метастабильных сталей, способствуя возникновению ферромагнитной фазы с ОЦК-решеткой [1–3]. Так, в аустенитной стали 45Г17ЮЗ в результате фазовых превращений, вызванных пластической деформацией со степенью обжатия более 50 % и последующей выдержкой при 450...600 °С, образуется ферромагнитный α -феррит, который может занять до 50 % объема металла. Из известных это самый мощный механизм образования ферромагнитной фазы с ОЦК-решеткой [2].

В сварных конструкциях и в продукции проката из аустенитных метастабильных сталей 08X18H9 и 12X18H10T, как правило, удается обнаружить коэрцитиметрическим методом даже в небольшом количестве ферромагнитную фазу с ОЦК-решеткой. Судя по роли, которая отводится ферромагнитной фазе в работах [1–5], научный и практический интерес представляет исследование возможности количественной оценки присутствия феррита в аустенитном металле и её использование для диагностики напряженно-деформирован-

ного состояния сварных конструкций из аустенитной стали в условиях эксплуатации.

С этой целью авторами работы предпринята попытка проанализировать ферритообразование в сталях 08X18H9 и 12X18H10T сварных конструкций при напряжениях, отвечающих их состоянию в упругой, пластической и предельной стадиях испытания статическими нагрузками.

Работа выполнялась в лаборатории гидравлических испытаний ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.

Исследование деформационного воздействия на металл в условиях статического нагружения проводили в процессе испытаний внутренним гидравлическим давлением двух цилиндрических (трубных) (рис. 1, 2) и двух сферических (шаровидных) (рис. 3) образцов. В работе было использовано следующее оборудование:

- коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М;
- ферритометр “Ferritghaltmesser1.053Institut dr.Forster”;
- гидроагрегат «Hofer»;
- датчик давления «Метран ДИ-100».

В качестве заготовок образцов (рис. 1–3) были взяты электросварные трубы и штампосвар-

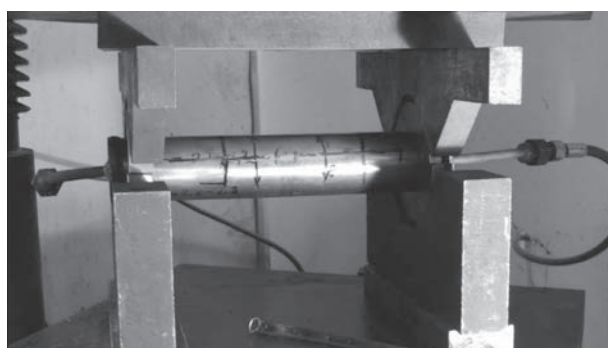


Рис. 1. Цилиндрический образец № 01 (76,1×3,0)



Рис. 2. Цилиндрический образец № 02 (42,4×1,5)

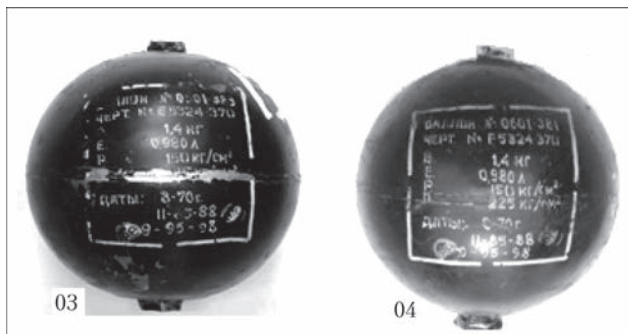


Рис. 3. Сферические образцы № 03 и № 04

ные шар-баллоны, металл которых подвергался в процессе их изготовления деформационно- и термическому воздействию. При подготовке и в процессе испытаний измеряли геометрические параметры образцов, магнитные свойства (табл. 1), механические свойства (табл. 2) и уточняли химический состав (табл. 3) металла. Также измеряли магнитную характеристику – коэрцитивную силу. Ферритную фазу оценивали с помощью ферритометра, а также металлографически. Химический состав испытуемых образцов подтверждали спектральным анализом, механические свойства металла получены из результатов нагружения по известной геометрии нагружаемого сечения.

Испытания цилиндрических образцов внутренним гидравлическим давлением (рис. 1, 2) проводили при температуре 20 °С со ступенчатым приращением давления. При достижении определенной степени деформации нагружение образца прекращалось и давление в нем снижалось до нулевой от-

метки. На каждой остановке проводили измерения периметра образца и коэрцитивной силы в одном и том же участке основного металла.

В металле сферических образцов перед испытаниями не было выявлено признаков ферромагнетизма по измерениям величины коэрцитивной силы H_c . Нагружение образцов внутренним давлением до предельного состояния происходило без остановок для измерений.

Деформацию цилиндрических и сферических образцов определяли по формуле:

$$\varepsilon = 100 (l - l_0) / l_0,$$

где l_0 – исходные значения периметра цилиндрического образца или базы на поверхности сферического образца; l – значения периметра и базы образцов после сброса нагрузки.

Оценку текущих изменений магнитных свойств, происшедших в металле цилиндрических образцов в результате деформационного воздействия, оценивали с помощью коэрцитиметра КРМ-Ц-К2М и в предельном состоянии ферритометром «Ferritghaltmesser». Как следует из графиков на рис. 4 и 5 при испытании избыточным давлением в условиях статической нагрузки рост пластической деформации увеличивает ферромагнетизм аустенитной стали.

В результате деформаций образца 01 на 16,45 % коэрцитивная сила возросла с 2,8 до 29,5 А/см, а объем фаз с ОЦК-решеткой с 0,6 до 9,0 %. В образце 02, нагруженном до предельного состояния ($\varepsilon = 38 \%$), коэрцитивная сила увеличи-

Таблица 1. Характеристика образцов перед испытанием (в состоянии поставки заготовок)

Наименование образцов	Характеристика образцов (диаметр x толщина стенки x длина), мм	Периметр в среднем сечении образца, мм	Коэрцитивная сила основного металла H_c , А/см	Объем α -фазы с ОЦК-решеткой в основном металле, %
Цилиндрический № 01	Сварная труба 76,1x3,0x500	240±0,5	2,8...4,7	0,6...0,8
Цилиндрический № 02	Сварная труба 42,4x1,4x500	134±0,5	1,5	0,3
Сферические № 03,04	Штамповарные баллоны 130x3,0	130±0,5	0	0

Таблица 2. Механические свойства металла образцов

Наименование образцов	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение γ , %	Марка стали
Цилиндрический № 01	501	701	–	70	08X18H9
Цилиндрический № 02	424,5	683,9	46,0	58,0	08X18H9
Сферический № 03 ^x	–	773,3	–	–	12X18H10T
Сферический № 04 ^x	–	724,8	–	–	12X18H10T

Примечание: ^x перед испытаниями механические свойства металла баллонов не определялись

Таблица 3. Химический состав исследуемого металла, мас. %

Наименование	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	Mo	S	P	Марка стали
Цилиндрический № 01	0,036	1,73	0,42	18,2	8,2	≤ 0,1	≤ 0,20	0,003	0,028	08X18H9
Цилиндрический № 02	0,036	1,73	0,43	18,7	8,0	≤ 0,1	≤ 0,27	0,005	0,029	08X18H9
Сферический № 03	0,098	1,33	0,66	18,3	10,6	0,66	≤ 0,1	0,003	0,040	12X18H10T
Сферический № 04	0,090	1,31	0,65	18,4	10,7	0,64	≤ 0,1	0,003	0,035	12X18H10T

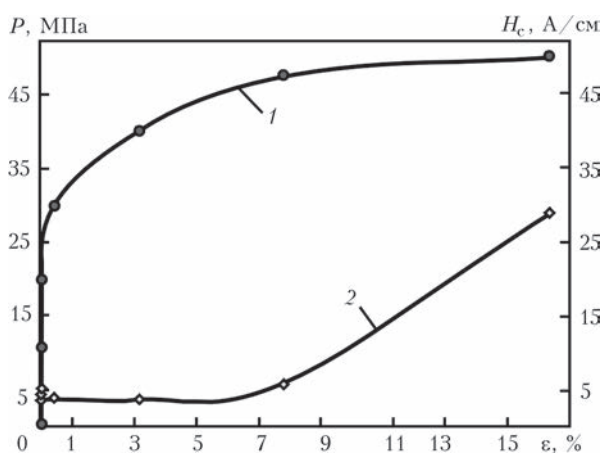


Рис. 4. Изменение коэрцитивной силы в зависимости от деформации образца № 01: 1 – давление; 2 – коэрцитивная сила

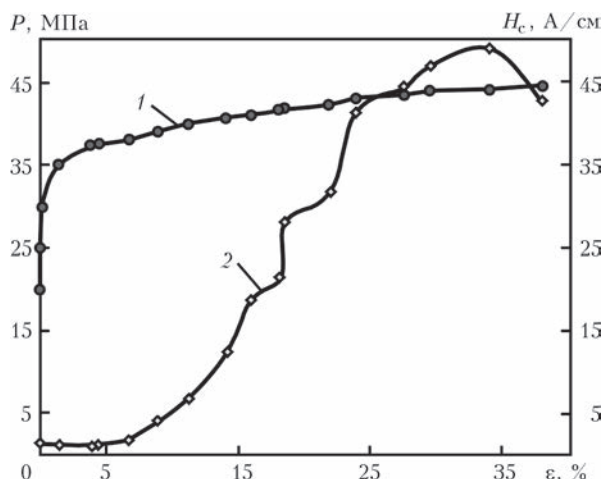


Рис. 5. Зависимость роста коэрцитивной силы от деформации образца № 02: 1 – деформация; 2 – коэрцитивная сила

Таблица 4. Показатели ферромагнетизма в металле сферических образцов

Образец	Марка стали	Относительная деформация ϵ , %	Коэрцитивная сила, А/см	Объем фаз с ОЦК-решеткой, %
Сферический 03	12Х18Н10Т	0...12,0	0...15,0	0...3,4
Сферический 04	12Х18Н10Т	0...2,5	0...2,0	0...0,4

лась с 1,5 до 47 А/см, а объем фаз с ОЦК-решеткой – с 0,3 до 39,0 %.

Как следует из графиков на рис. 4 и 5, а также из свойств углеродистых и низколегированных сталей, коэрцитивная сила может являться носителем информации о напряженно-деформированном состоянии, в котором находится металл образца при испытании. На стадиях упругого и упругопластического деформирования образца аустенитного металла отмечено по отношению к исходному значению незначительное уменьшение коэрцитивной силы. Как и в случае с ферромагнитным металлом, сказывается присутствие остаточных сжимающих напряжений [6]. После их компенсации внешним воздействием уже на стадии пластического деформирования (3...4 %) и до разрушения образцов происходил интенсивный рост коэрцитивной силы.

В металле сферических образцов № 03 и № 04 перед нагружением давлением не было обнаружено признаков ферромагнетизма ($H_c = 0$). После нагружения до разрушения при обмере было установлено, что в образцах из-за разнотолщинности стенок произошла неоднородная пластическая деформация (0...12 %), которая, в свою очередь, отразилась на образовании ферромагнитной фазы, измеренной ферритометром и коэрцитиметром. В табл. 4 приведены показатели ферромагнетизма для участков с разной степенью деформации. Как следует из приведенных значений, коэрцитиметрия чувствительнее ферритометрии при оценке магнетизма аустенитного металла, поскольку коэрцитивная сила определяется не только процентным содержанием ферритной фазы, но и степенью микрповрежденности и неупорядоченности кристаллической решетки этой составляющей.

Выводы

Согласно результатам проведенных исследований показана возможность осуществления с помощью коэрцитиметра оценки напряженно-деформированного состояния аустенитных сталей 08Х18Н9 и 12Х18Н10Т в сварных конструкциях, работающих под давлением.

Установлен механизм образования ферромагнитной фазы с ОЦК-решеткой в аустенитных сталях 08Х18Н9 и 12Х18Н10Т, подвергающихся деформационным и температурным воздействиям в процессе изготовления сварных конструкций. Появление и усиление магнетизма инициируется пластическим деформированием при статическом нагружении. Как показали эксперименты, образующаяся ферромагнитная фаза может занимать до 40 % объема металла.

Коэрцитиметрическим методом установлено, что процесс образования ферромагнитной фазы с ОЦК-решеткой в аустенитном металле происходит вплоть до разрушения сварных образцов.

Установлена прямая зависимость между показателем пластической деформации металла, объемом образовавшейся ферромагнитной фазы и значениями коэрцитивной силы, измеренными ферритометром «Ferritghaltmesser 1.053 Institut dr. Forster» и коэрцитиметром КРМ-Ц-К2М.

Как показал анализ результатов, в сравнении с ферритометром чувствительность коэрцитиметра КРМ-Ц-К2М выше при измерениях в начальной стадии образования ферромагнитной фазы с ОЦК-решеткой.

1. Влияние внешних воздействий на магнитные свойства и структуру аустенитной стали 45Г17ЮЗ. 1. Деформационное воздействие / А.И. Дерягин, В.А. Завалишин, Н.Д.



- Земцова и др. // Физика металлов и металловедение. – 1992. – № 11. – С. 124–130.
2. *Изменение* магнитных свойств аустенитной стали 45Г17Ю3 в процессе образования феррита в слабом магнитном поле / В.Г. Кулеев, В.В. Сагарадзе, М.Б. Ригмант и др. // Там же. – 1993. – **76**, № 1. – С. 82–86.
 3. *Изменение* магнитных свойств метастабильной аустенитной стали при упругопластическом деформировании / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, С.Ю. Митропольская и др. // Металловедение и термич. обработка металлов. – 2009. – № 9. – С. 15–21.
 4. *Исламкулов К. М., Смагулов Д. У.* Способ повышения сопротивляемости высоколегированной (аустенитной)

стали образованию горячих трещин при сварке // Межд. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11 (часть 1). – С. 52–55.

5. *Снежной Г. В.* Роль магнитного состояния аустенита в формировании коррозионной стойкости аустенитных хромоникелевых сталей // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 8 (95). – С. 141–144.
6. *Нехотящий В. А., Юхимец П. С., Безлюдько Г. Я.* Использование коэрцитивной силы для оценки технического состояния конструкций, работающих под давлением // Технич. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 1. – С. 49–53.

The paper gives the results of studying the generation and enhancement of magnetic properties of austenitic steels 08Kh10N9 and 12Kh18N10T during bench loading of samples by inner hydraulic pressure in the static mode. This opens up the prospects for performance of practical diagnostics of the current state of structures and equipment from austenitic steels, including their welded joints. 6 References, 4 Tab, 5 Figures.

Key words : austenitic steels, ferromagnetic phase with BCC-lattice, diagnostics, welded structures, coercive force

Поступила в редакцию
23.07.2015



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

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сообщение 1. Тепловые нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА

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

Акустико-эмиссионный мониторинг трубопроводов, работающих при высоких температурах, показывает наличие зон акустической активности. Понимание механизмов формирования дефектов в таких зонах позволяет повысить качество проводимого АЭ контроля и выработать рекомендации по безопасной эксплуатации трубопроводов. Рассмотрен характер и величины температурных полей, возникающих при внезапном приложении высокой температуры к внутренней стенке трубы. На основе преобразования Лапласа выделена и показана динамическая составляющая температурного поля при внезапном приложении тепловой нагрузки. Установлено наличие высокого градиента распределения температуры в направлении радиуса при динамическом нагреве. Показано, что более благоприятное распределение «пусковой» температуры в стенке трубы происходит при более медленной подаче тепловой нагрузки к ее внутренней стенке. Библиогр. 5, рис. 5.

Ключевые слова: трещины, нагрев, динамическая и квазистатическая составляющие, благоприятный режим пуска

Длительная работа трубопроводов в условиях высоких температур приводит к постепенному накоплению в них рассеянных повреждений, а впоследствии к формированию на их основе трещин и трещиноподобных дефектов. В некоторых случаях на внутренней поверхности трубопроводов возникают трещины достаточно большой длины, ориентированные вдоль образующей трубы и распространяющиеся в глубину трубы на незначительные (до 4...5 мм) расстояния (по данным Л.А. Латушенко, Змиевская ГРЭС).

АЭ мониторинг трубопроводов горячего пром-перегрева (ГПП) [1] показывает наличие зон акустической активности (рис. 1), что свидетельствует о формировании дефектов. Понимание механизмов образования дефектов в таких зонах позволяет повысить качество проводимого АЭ контроля и выработать рекомендации по безопасной эксплуатации трубопроводов.

Отметим, что режимы пуска и остановки оборудования, работающего при высоких температурах, имеет достаточно большое значение для прочности его узлов и отдельных элементов. Наличие гидравлических и пневматических ударов, вызываемых резким изменением режима работы, приводит к подвижности структуры материалов и, как следствие к развитию или перемещению дефектов. Дефекты могут объединяться и прогрессировать. Опасность в значительной степени определяется числом изменений режимов эксплуатации и резкостью этих изменений. В процессе эксплуатации количество дефектов растет, вследствие чего режимы эксплуатации и время нара-

ботки оказывают все большее влияние на общую работоспособность конструкции. В представляемом Сообщении 1 рассматриваются возможные причины появления и роста таких трещин (а также см. продолжение в следующем выпуске журнала).

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

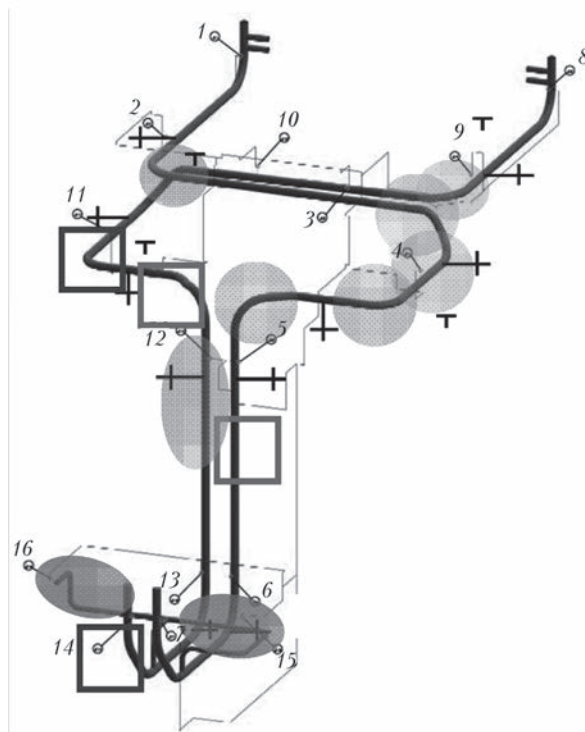


Рис. 1. Схема трубопровода ГПП с местами повышенной АЭ активности (цифрами указаны номера АЭ датчиков, крестиками – технологические отметки)



ным диаметром 630 мм и толщиной стенки 25 мм. Марка материала трубы 15X1M1Ф (рис. 2). Для обследования и выполнения ремонтных работ после непродолжительной остановки оборудования производят подачу горячего пара. При нарушении штатной технологии пуска трубопровода в эксплуатацию возможен термоудар по холодной внутренней стенке трубы. В этом случае возникают значительные напряжения, которые приводят к появлению новых дефектов, движению, а также развитию и слиянию уже существующих, что для материала трубы с большим временем наработки может привести к образованию трещин и разрушению. Можно выделить два этапа воздействия тепла на материал трубы. На первом «внезапно» приложенное к стенке внутренней поверхности трубы тепло приводит к динамическому температурному воздействию на материал. На этом этапе на небольшой глубине стенки происходит резкое образование неравномерного температурного поля. Температуры могут быть невысокие, но их градиент и связанные с ним температурные напряжения достаточно большие. Динамическая часть температурного поля быстро уменьшается и на смену первому этапу приходит второй с более приемлемыми для обеспечения прочности трубы условиями нарастания температуры. Происходит постепенный нагрев трубы вплоть до момента образования стационарного температурного поля. Очевидно, что наиболее опасным моментом пусковых работ является первый этап с большим градиентом распределения температур. Рассмотрим более детально возникновение и стабилизацию температурного поля в трубопроводах при их эксплуатации.

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс распространения тепла в стенке трубы для ее элемента единичной длины, может быть записано в виде:

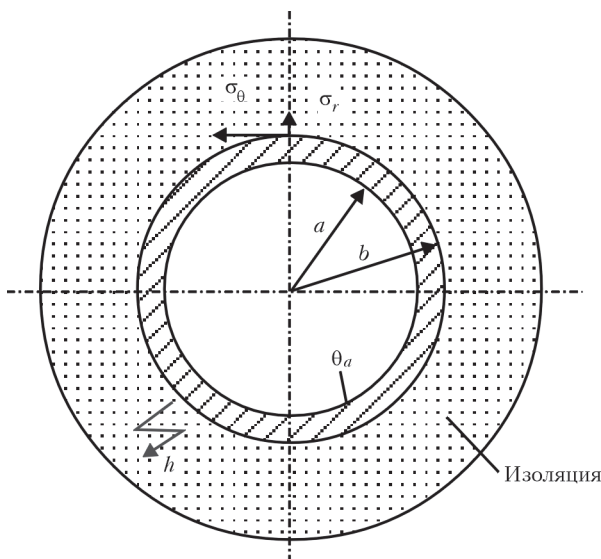


Рис. 2. Элемент трубы паропровода в изоляционном пакете

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{a_k} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Начальным условием задачи является наличие температуры в стенке трубы в момент времени $t = 0$, т.е. при $t = 0$ температура на внутренней стенке трубы равна θ_a и определяется она количеством тепла Q_a , приложенного к внутренней стенке. Коэффициент температуропроводности a_k для данной стали составляет $0,07 \text{ см}^2/\text{с}$.

Для удовлетворения принятого начального условия проведем преобразование Лапласа [3] по времени t приведенного уравнения (1):

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} - \frac{p}{a_k} \bar{\theta} - \frac{\theta_a}{a_k} \exp(-pt) \Big|_0^\infty = 0. \quad (2)$$

Выполненное преобразование Лапласа позволяет выделить начальный тепловой удар, воспринятый трубой в момент нагнетания пара ($t = 0$). Теперь зафиксируем место приложения этой температуры, определяемое δ -функцией по радиусу r . Таким местом является внутренняя стенка трубы. Тогда после выполнения прямого конечного преобразования Ханкеля по координате r выражения (2) получим:

$$-\left(\alpha^2 + \frac{p}{a_k}\right) \bar{\bar{\theta}} + \theta_a \int_0^b \frac{\delta(r-a_0)}{a_k 2\pi r} r J_0(\alpha r) dr. \quad (3)$$

При этом принято, что произвольные постоянные конечного преобразования Ханкеля в сумме равны нулю и образуют характеристическое уравнение условия обратного преобразования. Величина $2\pi r$ в знаменателе подынтегральной функции появилась в результате приведения уравнения (2) к осесимметричному виду путем интегрирования всего выражения (2) в пределах от 0 до 2π с учетом того, что $\delta(\varphi r) = \delta(\varphi)/r$; a_0 – место приложения тепла, в данном случае совпадающее с радиусом внутренней поверхности трубы a .

Тогда уравнение (3) может быть переписано в виде:

$$-\left(\alpha^2 + \frac{p}{a_k}\right) \bar{\bar{\theta}} = -\theta_a \frac{J_0(\alpha a_0)}{2\pi},$$

$$\bar{\bar{\theta}} = \frac{J_0(\alpha a_0)}{2\pi a_k} \frac{\theta_a}{\alpha^2 + \frac{p}{a_k}}.$$

Обратное преобразование Лапласа [3], примененное к данному уравнению, даст:

$$\bar{\theta} = \theta_a \frac{J_0(\alpha a_0)}{2\pi} \exp(-\alpha^2 a_k t).$$

Учитывая, что преобразование Ханкеля применимо лишь при определенных значениях α , обозна-



чим их α_n . Следует также иметь в виду, что обратное конечное преобразование Ханкеля предусматривает α_n как положительный корень приведенного ниже характеристического уравнения [4, 5]:

$$\alpha_n J_0(\alpha_n b) + h J_1(\alpha_n b) = 0.$$

Здесь h постоянная, определяемая из граничных условий. В данном случае это постоянная теплоотвода $h = -\frac{\alpha_T}{\lambda_0} \text{ 1/см.}$

Выполнив обратное конечное преобразование Ханкеля с учетом того, что $\theta_a c \rho F = Q_a$, где c – удельная теплоемкость материала трубы (кал/г °С); ρ – плотность материала (г/см³); F – площадь прогреваемого материала трубы; Q_a – количество тепла в калориях в стенке трубы (кал/см), получим:

$$\theta = \frac{Q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n^2 a J_0(\alpha_n a) J_0(\alpha_n r)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)} \exp(-\alpha_n^2 a_k t). \quad (4)$$

Построим распределение температуры θ в стенке трубы в зависимости от времени и расстояния от ее центра. Прежде всего необходимо определить величину импульса теплового воздействия на внутреннюю стенку. Предполагая, что перегретый пар, поданный в трубопровод, имеет температуру 550 °С, вычислим импульс тепла с учетом того, что в начальный момент приложения $Q_a = F c \rho \theta_a$.

Примем значение коэффициента теплоотвода равным 0,0161 см⁻¹ [2, 4], коэффициент теплопроводности для стали 15Х1М1Ф $\lambda_0 = 0,08$ кал/см·с, размеры трубы: $a = 29$ см, $b = 31,5$ см, $c \rho = 1,14$ кал/см³. С учетом принятых параметров и величины окружности по внутренней стенке трубы, равной $2\pi a$, величину Q_a можно принять равной 6270 кал/см.

На рис. 3 представлены кривые распределения температур в зависимости от времени и расстояния от центра трубы. Как видим, температуры незначительны, но имеют достаточно высокий

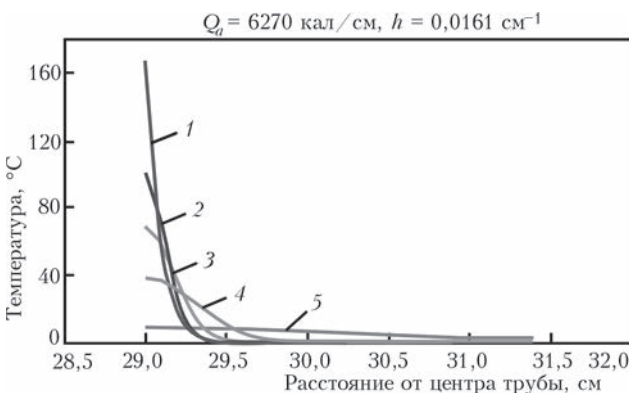


Рис. 3. Температурное поле (формула (4)) в стенке трубы при внезапном температурном ударе: 1 – $t = 0,05$ с; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,6; 5 – 10

градиент. Кроме того, поле быстро исчезает, хотя успевает за короткий промежуток времени привести к образованию благоприятных условий для появления трещин. Механизм возможного процесса трещинообразования на внутренней поверхности трубопроводов будет подробно рассмотрен в Сообщении 2.

Рассмотрим второй этап, когда температура начала распространяться внутрь по стенке трубы, и условия резкого динамического воздействия на материал трубы сменились на более медленный и благоприятный процесс.

Распространение тепла в этом случае может быть получено путем интегрирования выражения (4) в пределах действия непрерывного источника. Тогда после интегрирования получим:

$$\theta = \frac{q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - \exp(-\alpha_n^2 a_k t)] J_0(\alpha_n a) J_0(\alpha_n r)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)}, \quad (5)$$

где q_a имеет размерность кал/см·с и представляет собой непрерывно действующий источник тепла в течение всей последующей эксплуатации трубопровода.

Формула (5) показывает, что в начальный момент времени температура стенки трубы равна нулю, так как динамическое температурное поле исчезло и начал действовать с нуля процесс насыщения теплом материала трубопровода (рис. 4).

Следует отметить, что при $t = \infty$ температурное поле становится стационарным и его градиент в этом случае зависит исключительно от качества изоляции труб, т. е. от условий теплоотвода. Расчеты температуры по формуле (5) для стационарного случая затруднены из-за плохой сходимости суммы ряда (5). Поэтому целесообразно формулу для расчета в этом случае получить непосредственно из дифференциального уравнения без времени t . Не приводя это решение из-за его простоты, покажем лишь сам

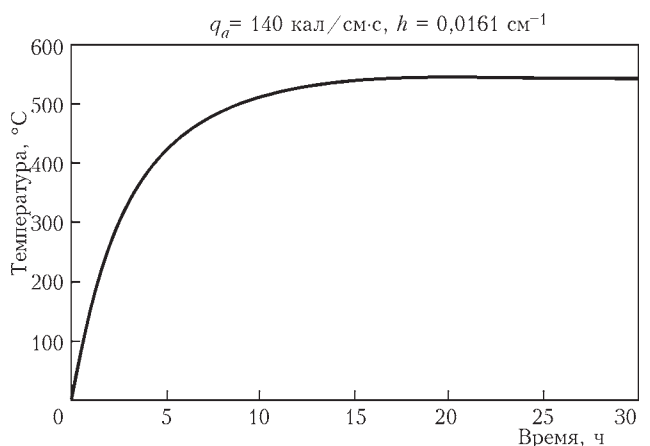


Рис. 4. Насыщение теплом трубы в процессе проведения пусковых работ. Расчет приведен для внутренней стенки трубы (формула (5))

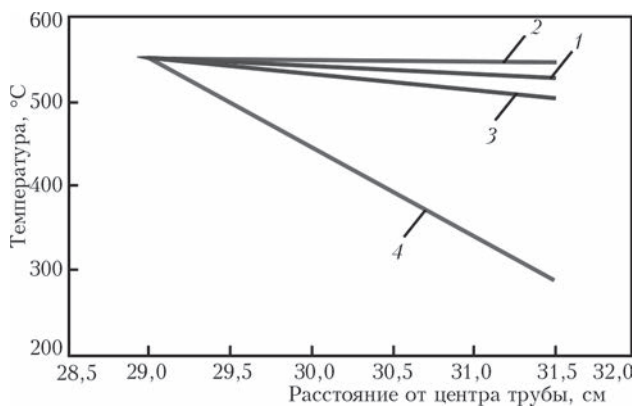


Рис. 5. Установившееся температурное поле в стенке трубы при различном отводе тепла от ее наружной стенки (температура на внутренней поверхности стенки равна 550 °С (формула (6)): 1 – $h = 0,0161$; 2 – $0,003$; 3 – $0,035$; 4 – $0,35$

результат для случая с теплоотводом от наружной стенки трубы h (рис. 5):

$$\theta = \theta_0 \left[1 - \frac{bh \ln\left(\frac{r}{a}\right)}{1 + bh \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \right]. \quad (6)$$

Величины, входящие в формулу (6), те же, что и приняты выше, а θ_0 – непрерывно действующая температура на внутренней стенке трубы. Расчеты показывают, что величина теплоотвода h может существенно исказить характер распределения температуры в стенке трубы и вызвать появление дополнительных по отношению к рабочим напряжений.

Acoustic emission monitoring of pipelines operating at high temperatures, reveals presence of acoustic activity zones. Understanding the mechanisms of defect formation in such zones allows improvement of the quality of performed AE monitoring and issuing recommendations on safe operation of pipelines. Information 1 deals with the nature and magnitude of temperature fields forming at sudden application of high temperature to pipe inner wall. Dynamic component of temperature field at sudden application of thermal load to pipe inner wall was separated and shown, based on Laplace transformation. Presence of a high gradient of temperature distribution in the direction of the radius at dynamic heating was established. It is shown that a more favourable distribution of “starting” temperature in pipe wall occurs a slower application of thermal load to its inner wall.

Key words : cracks, heating, dynamic and quasistatic component, favourable starting mode

Поступила в редакцию
14.03.2015

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 • вихрострумівий • 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»)

Выводы

Распространение тепла в стенке трубы при ее нагреве может быть условно разделено на две составляющие – динамическую, выделенную путем преобразования Лапласа исходного дифференциального уравнения, и квазистатическую, описывающую процесс дальнейшего постепенного распространения тепла в стенку трубы.

Для получения благоприятных режимов нагрева трубы при пусках необходимо обратить внимание на необходимость создания условий более «мягкого» теплового нагружения трубы, особенно в начальный момент времени. Обеспечить дальнейшее постепенное поднятие температуры в пределах не менее 25...30 ч.

Предложенные формулы могут быть использованы при расчете температурного поля действующих трубопроводов с целью выбора наиболее благоприятных условий их пуска и эксплуатации.

1. Патон Б. Е., Лобанов Л. М. О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 7–14.
2. Мак-Адамс. Теплопередача. – М.: Металлургиздат, 1961. – 278 с.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
5. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.

СЕЛЕКТИВНЕ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ТОНКОСТІННИХ ВИРОБАХ ІЗ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ НАКЛАДНИМ ВИХРОСТРУМОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

В. М. УЧАНІН

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: vuchanin@gmail.com

Представлено накладний вихрострумний перетворювач подвійного диференціювання високої роздільної здатності діаметром 3 мм для дефектоскопії тонкостінних оболонок. Показано високу чутливість до поверхневих і підповерхневих дефектів по всій товщині об'єкта контролю. Показано можливість селективного виявлення дефектів заданої глибини залягання, а також можливість заглушувати сигнал від змін зазору. Завдяки малим розмірам, високій роздільній здатності і чутливості до дефектів з різною глибиною залягання запропонований вихрострумний перетворювач може бути використаний у складі обертальних зондів для контролю труб теплообмінників, а також для побудови багатоелементних систем контролю. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: накладний вихрострумний перетворювач подвійного диференціювання, селективний контроль, трубки теплообмінників

На практиці часто виникає проблема виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів в тонкостінних виробках, які зароджуються і розвиваються з різних поверхонь об'єкта контролю. При цьому необхідно проводити ідентифікацію дефектів, зокрема визначати їх глибину або глибину залягання для внутрішніх дефектів з метою визначення залишкової товщини, необхідної для оцінки роботоздатності конструкцій з позицій механіки руйнування. Для вирішення цієї задачі найперспективнішим є вихрострумний метод із застосуванням відносно низьких робочих частот, який дозволяє забезпечити високу чутливість і роздільну здатність. Подібна задача виникає, зокрема, під час контролю труб теплообмінників із аустенітних сталей з метою виявлення експлуатаційних дефектів різного типу [1]. Для такого контролю широко використовується вихрострумний метод, який забезпечує можливість визначення товщини виробів і має високу чутливість до дефектів різного походження [2–4]. Зазвичай вихрострумний контроль (ВК) трубок теплообмінників в умовах експлуатації проводять внутрішніми зондами через відсутність доступу до зовнішньої поверхні трубок. Для ВК трубок використовують різні варіанти вихрострумного методу, які можна умовно поділити на три основні групи, що побудовані на використанні: прохідного вихрострумного перетворювача (ВСП) з коаксіальним розташуванням обмоток [4, 5]; накладного ВСП, що обертається за спіральною траєкторією з внутрішньої сторони трубки; внутрішніх багатоелементних накладних ВСП. Кожний з

цих варіантів має свої недоліки і переваги, які проаналізовано в роботі [4]. Зазначимо тільки, що контроль за допомогою внутрішніх накладних ВСП має переваги по чутливості до дефектів різного напрямку і просторовій роздільній здатності.

Накладні ВСП для виявлення дефектів з середини труб теплообмінників парогенераторів типу ПГВ-1000, які використані в реакторах типу ВВЕР-1000, повинні забезпечувати чутливість до поверхневих і підповерхневих дефектів в трубках товщиною 1,5 мм і мати мінімально можливі габарити для розміщення всередині труб із внутрішнім діаметром 13 мм.

Метою цієї роботи є дослідження нового мініатюрного накладного ВСП високої роздільної здатності, на основі якого можуть бути створені технології контролю тонкостінних оболонок, зокрема труб теплообмінників із аустенітних сталей.

Методика експерименту. Для вибору перспективного ВСП і проведення дослідження виготовили шаруватий зразок із аустенітної сталі загальною товщиною 1,5 мм у вигляді набору п'яти пластин товщиною 0,3 мм кожна (рис. 1). Дефект типу тріщина імітували стиком двох пластин, що дозволило створювати тріщину глибиною 0,3 мм. Для дослідження впливу місцеположення дефекту, зокрема глибини його залягання, на сигнал ВСП пластину з дефектом розміщували у різних шарах зразка. Пластини затискали по всьому периметру у спеціальному пристрої з метою усунення можливих зазорів між пластинами. При цьому забезпечували доступ до поверхні зразка в центральній зоні для встановлення і переміщення ВСП через зону дефекту.

Вибір типу ВСП і оптимальної робочої частоти проводили на зразку, що імітував найскладні-

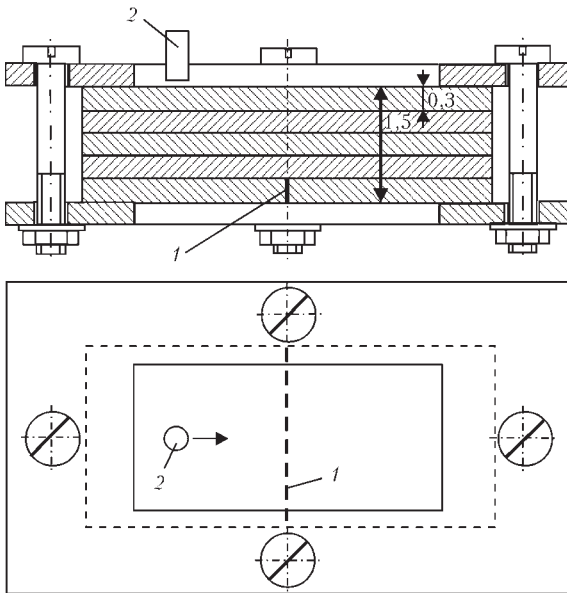


Рис. 1. Шаруватий зразок для дослідження накладних ВСП для дефектоскопії тонкостінних конструкцій: 1 – дефект; 2 – ВСП

ший випадок виявлення дефекту з максимальною глибиною залягання 1,2 мм. Досліджували сигнали мініатюрних ВСП різного типу, зокрема, абсолютного екранованого ВСП з рознесеними обмотками, ВСП подвійного диференціювання і ВСП з ортогональними обмоткою збудження і вимірювальною обмоткою [6, 7]. Найкращу чутливість до вказаного вище дефекту показав мініатюрний варіант ВСП подвійного диференціювання [7], який має достатньо високу чутливість і роздільну здатність в поєднанні з малими габаритами.

Під час створення мініатюрного ВСП для всіх обмоток використані феритові осердя діаметром 0,75 мм з початковою магнітною проникністю матеріалу осердя 2300. Збуджувальна і вимірювальна обмотки намотані проводом діаметром 0,06 мм у два шари (20 і 15 витків – збуджувальна обмотка, 25 і 23 витки – вимірювальна обмотка). Діаметр ВСП складає 2,8...3,0 мм, що дозволяє за необхідності монтувати його на роторі обертальних зондів. Сигнали ВСП досліджували за допомогою вихрострумової плати EDDYMAX німецької фірми «ТЕСТ МАШИНЕН ТЕКНИК» (Швармштедт, Німеччина).

Для вибору оптимальної робочої частоти сигнали ВСП досліджували на різних робочих частотах у діапазоні від 50 до 500 кГц на дефекті з максимальною глибиною залягання 1,2 мм. Із побудованої залежності амплітуди сигналу від робочої частоти (рис. 2) видно, що найкращу чутливість ВСП має на робочій частоті 200 кГц, яку використовували під час досліджень.

Результати і їх обговорення. На рис. 3 представлені сигнали накладного ВСП

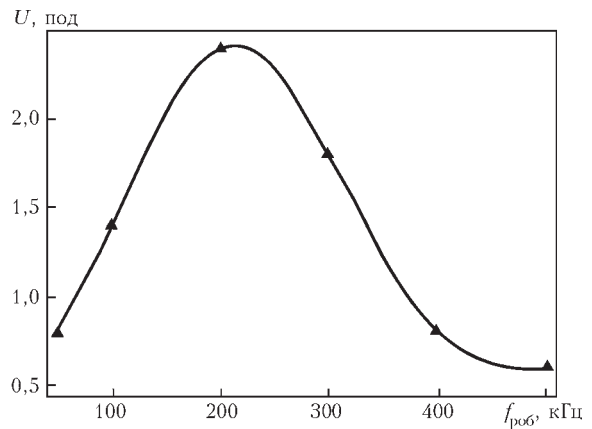


Рис. 2. Амплітудно-частотна залежність сигналу від дефекту (позначено Д) з максимальною глибиною залягання 1,2 мм. При цьому подано сигнали в комплексній площині (рис. 3, а), а також вертикальну (рис. 3, б) і горизонтальну (рис. 3, в) складові сигналу при скануванні через зону дефекту. Одночасно на дефектограмах представлено сигнали (позначено З) від збільшення зазору між ВСП і контрольованою поверхнею. Видно, що ВСП на вибраній робочій частоті 200 кГц забезпечує виявлення дефекту типу тріщини на зворотній стороні (глибина залягання 1,2 мм) пластини із аустенітної сталі товщиною 1,5 мм. При цьому сигнал від дефекту має характерний для ВСП подвійного диференціювання «квазіабсолютний» вигляд. Відомо, що для дефекту локального типу ВСП подвійного диференціювання має чотири окремі зони чутливості [7]. Для досліджуваного ВСП ці зони чутливості є достатньо локальними (біля 0,5 мм), оскільки усі вони загалом не виходять за межі зони діаметром 2,0 мм, що визначає його високу роздільну здатність. Сигнал від дефекту має властивий для цих ВСП «гострий» характер, що вказує на можливість виділення його на фоні «повільних» завод, пов'язаних з неоднорідністю питомої електропровідності і геометрії об'єкта контролю. Сигнал від зазору отримали шляхом значного (більш ніж на 50 мм) віддалення ВСП від контрольованої поверхні. Тим не менше, сигнал від зазору є меншим від сигналу від дефекту, що має максимальну

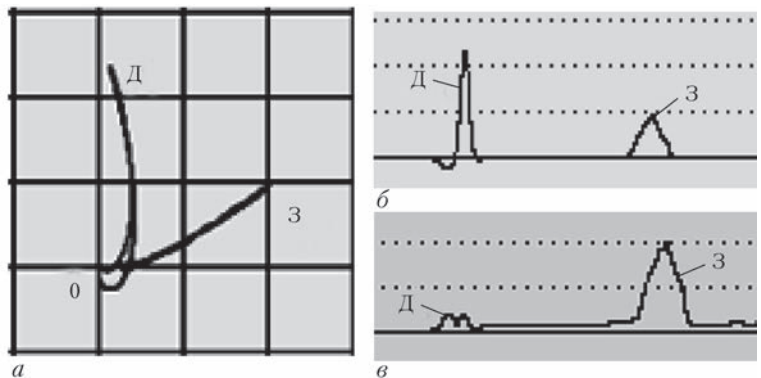


Рис. 3. Сигнали від дефекту (Д) з глибиною залягання $h_3 = 1,2$ мм і сигнали від зазору (З) у комплексній площині (а) і з часовою розгорткою вертикальної (б) і горизонтальної (в) складових

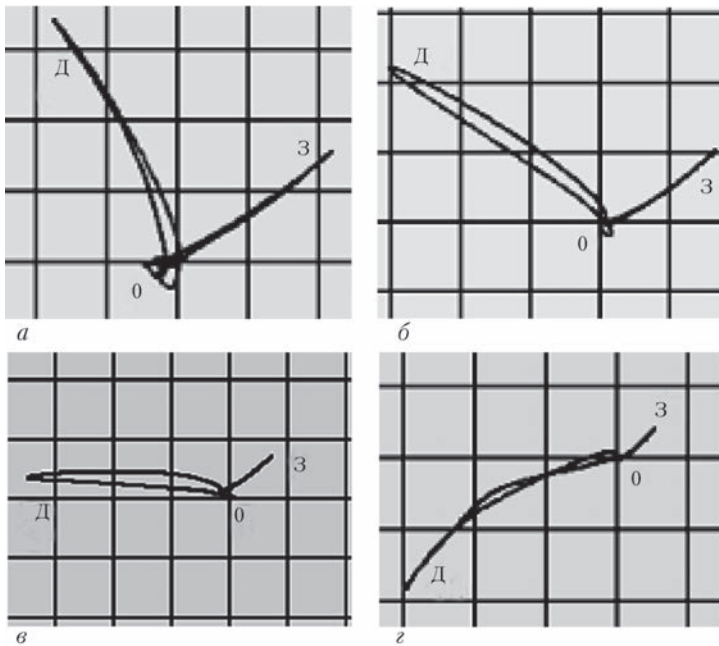


Рис. 4. Сигнали від дефектів із глибиною залягання $h_3 = 0,9$ мм (а); $0,6$ (б); $0,3$ (в) і 0 (з)

глибину залягання (1,2 мм). До того ж напрямки годографів від дефекту (Д) і впливу зазору (З) відрізняються на кут, близький до 60° , що дає можливість розділення сигналів від дефектів і сигналів від зміни зазору під час сканування на основі фазової селекції.

На рис. 4 представлено годографи сигналів від дефектів з різною глибиною залягання в діапазоні від $h_3 = 0,9$ мм до $h_3 = 0$ (поверхневий дефект). При цьому чутливість апаратури на рис. 3 ($h_3 = 1,2$ мм) і рис. 4 а ($h_3 = 0,9$ мм) однакова. При подальшому зменшенні глибини залягання (рис. 4, б–з) чутливість кожного разу зменшувалась на 6 дБ, що відображується у поступовому зменшенні сигналу від зазору (З). Із годографів на рис. 4 видно, що фазовий кут сигналу від дефекту залежить від глибини залягання дефекту, що дозволяє, зокрема, ідентифікувати дефекти, що утворюються на різних поверхнях. Годографи від поверхневих дефектів мають бути орієнтовані подібно до сигналів на рис. 4, з. При цьому годографи сигналу від поверхневого дефекту і сигналу від змін зазору є протилежними за напрямком.

Висновки

Представлено новий мініатюрний накладний ВСП подвійного диференціювання високої роздільної здатності діаметром 3 мм для дефектоскопії тонкостінних оболонок.

Surface double differential type eddy current probe characterized with high spatial resolution and small size (3 mm) is presented. High sensitivity to surface and subsurface defects in inspected object is shown. The possibility for selective detection of defect with known depth of bedding and possibility to suppress lift-off signal also is shown. Due small size and high performance characteristics, such as spatial resolution and sensitivity to defects with different depth of bedding, proposed eddy current probe can applied for inspection of heat exchanger tubes in rotational mode and for array inspection system creation.

Key words: double differential type eddy current probe, selective inspection, heat exchanger tubes

Визначено оптимальну робочу частоту запропонованого ВСП під час дефектоскопії тонкостінних (товщиною 1,5 мм) виробів із аустенітних сталей.

Проведено дослідження запропонованого ВСП, які показали високу чутливість до поверхневих і підповерхневих дефектів по всій товщині об'єкта контролю.

Показано можливість селективного виявлення дефектів заданої глибини залягання, а також можливість відстроюватись від впливу змін зазору.

На основі визначення фази сигналу від дефекту (або напрямку годографу в комплексній площині) може бути реалізована ідентифікація дефектів за глибиною їх залягання, що дозволяє визначати залишкову товщину об'єкта контролю в дефектних зонах.

Завдяки малим розмірам, високій роздільній здатності і чутливості до дефектів різної глибини залягання запропонований ВСП може бути використаний зокрема в складі оберտальних зондів для контролю труб теплообмінників [8]. Також такі ВСП можуть бути використані для побудови багатоелементних систем контролю [7].

1. Митрофанов А. С., Неклюдов І. М., Ожигов Л. С. Експлуатаційні дефекти в теплообмінних трубах парогенераторів АС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 4. – С. 109–113.
2. IAEA-TECDOC-981. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Steam generators. – Vienna: Intern. atomic energy agency, 1997. – 173 p.
3. IAEA-EBP-WWER-II. Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER nuclear power plants. – Vienna: Intern. atomic energy agency, 1998. – 21 p.
4. Uchanin V., Najda V. The development of eddy current technique for WWER steam generators inspection // Steam Generators Systems: Operational Reliability and Efficiency / Ed. by V. Uchanin. – Rijeka, Croatia: INTECH. – 2011. – P. 145–164.
5. Учанін В. М. Аналіз сигналів внутрішнього коаксіального вихрострумного перетворювача для дефектоскопії труб парогенераторів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 3. – С. 112–116.
6. Учанін В. Н. Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации // Техн. диагностика и неразруш. контроль (Обзор). – 2010. – № 4. – С. 24–29.
7. Учанін В. М. Накладні вихрострумного перетворювачі подвійного диференціювання. – Львів: СПОЛЮМ, 2013. – 208 с.
8. Пат. 100441 України, МПК G01N27/90. Внутрішній оберտальний зонд для контролю труб / В.М. Учанін, Г.О. Шаповалов. – № а 2011 03297; Заявл. 21.03.2011; Опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.

Надійшла до редакції
18.07.2015

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ДАТЧИКОВ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

С. А. НЕДОСЕКА, М. А. ОВСИЕНКО, Л. Ф. ХАРЧЕНКО, М. А. ЯРЕМЕНКО

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

Рассмотрены вопросы совершенствования методологии АЭ контроля путем решения проблемы быстрой и оперативной оценки возможных погрешностей при локации источников АЭ на объектах сложной геометрии. Оценка выполняется при помощи автоматизированного программного виртуального тестирования для заранее задаваемых конфигураций локационных антенн. Несомненным преимуществом предложенного решения является выполнение оценки до начала расстановки датчиков на объекте, что позволяет подбирать оптимальные схемы их размещения и наиболее подходящий алгоритм расчета координат источников АЭ. Выполненная работа полезна для автоматизации АЭ контроля, углубленного анализа АЭ данных, разработки новых алгоритмов и программ локации источников АЭ и является очередным этапом разработки интеллектуальных систем контроля. Библиогр. 7, рис. 10.

Ключевые слова: АЭ контроль, виртуальное тестирование, точность локации, скорости звуковых волн в материале

Постоянно растущее применение метода акустической эмиссии (АЭ) на разнообразных промышленных объектах, расширение их ассортимента требует постоянного совершенствования аналитических и экспериментальных методов определения параметров, характеризующих состояние контролируемой конструкции [1–3]. Одним из таких параметров являются координаты источников АЭ сигналов. От точности определения координат существенно зависит надежность прогнозирования разрушающей нагрузки материала конструкции и оценки ее остаточного ресурса. Это диктует новые задачи при разработке методологии АЭ контроля и соответствующего программного обеспечения [1–3], которые связаны с обеспечением точности локации координат источников АЭ и оперативной настройкой АЭ систем.

Переход к контролю объектов со сложной геометрией, особенно при произвольной расстановке датчиков АЭ, требует быстрой и оперативной оценки возможных погрешностей при локации источников АЭ. Ранее такую оценку проводили непосредственно на объекте экспериментальным путем после расстановки датчиков с использованием импульсного прозвучивания от специального генератора или методом Су–Нильсена, основанном на сломе графитового стержня.

Указанные способы оценки имеют ряд недостатков. Прежде всего надежная проверка точности локации требует длительного времени, которого при проведении контроля в условиях реального производства может просто не хватить [4]. В конструкциях и конструктивных элементах конечных размеров происходят изменения

спектральных, амплитудных и частотных характеристик волн АЭ, их взаимодействие и переотражение. Это сказывается на локальных скоростях волн на конкретных участках материала, регистрируемых временах прихода сигнала на датчики и определении координат источника. Если после расстановки датчиков выяснилось, что выбранная конфигурация их расположения не обеспечивает необходимой точности локации, потребуются переустановка датчиков и повторная проверка возникающих погрешностей. При отсутствии доступа к поверхности объекта контроля экспериментальная проверка точности локации становится невозможной.

В данной работе представлен один из способов решения описанной выше проблемы при помощи автоматизированного программного виртуального тестирования погрешностей локации для заранее задаваемых конфигураций локационных антенн. Несомненным преимуществом такого способа проверки является то, что ее можно выполнить очень быстро, причем до начала физической расстановки датчиков на объекте. Таким образом, подбираются оптимальная схема размещения датчиков и наиболее подходящий алгоритм расчета координат источников АЭ.

Программа для тестирования работы алгоритмов локации была создана вначале как полностью автономное приложение для компьютера, но такой подход оказался неэффективным. Пользователь вынужден был переключаться между программами для АЭ испытаний и для тестирования локации, конфигурировать локационные антенны в каждой из программ отдельно. В связи с этим модуль для тестирования

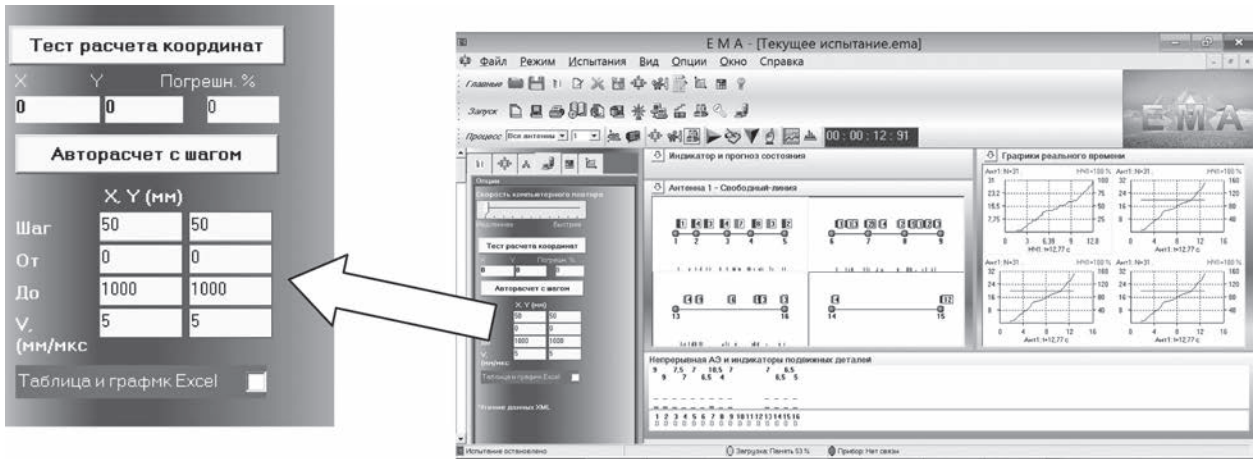


Рис. 1. Окно испытаний программы EMA-3.9 с элементами управления виртуальным тестированием погрешностей определения координат

локации был интегрирован в окно испытаний программы EMA версии 3.9. Панель управления виртуальным тестированием локации размещена вертикально в левой части окна испытаний (рис. 1) и содержит поля ввода для настройки тестирования, поля для оперативного вывода погрешностей локации, кнопки для запуска ручного и автоматического режимов тестирования и флажок, включающий вывод результатов тестирования в виде таблиц и графиков Microsoft Excel.

Метод тестирования достаточно прост. Вначале задают координаты датчиков, координаты виртуального источника АЭ и скорости распространения звуковых волн в материале – реальные и закладываемые в расчет координат. Затем на основании этих данных рассчитывается время прихода звуковой волны на каждый из датчиков локационной антенны. При возникновении события АЭ, ко-

торое вызовет N срабатываний различных датчиков, каждое из них будет характеризоваться своим временем начала t_1, t_2, \dots, t_n . При реальных измерениях эти времена неизвестны, известны только разности времен срабатывания различных датчиков антенны $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$, на основании чего и построены все существующие алгоритмы определения координат.

Таким образом, расчетные времена распространения сигнала АЭ от виртуального источника до датчиков необходимо преобразовать в разности времен прихода, или, иными словами, задержки. Если считать, что ближе всего к источнику находится и первым сработает датчик №1, то $\Delta t_1 = 0$, а задержки Δt_n на остальных датчиках получают простым вычитанием $\Delta t_n = t_n - t_1$.

Далее полученные значения задержек подставляют в формулу расчета координат, после чего

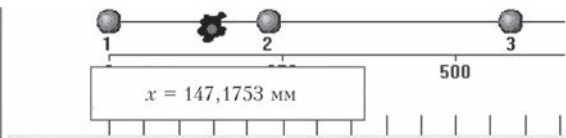
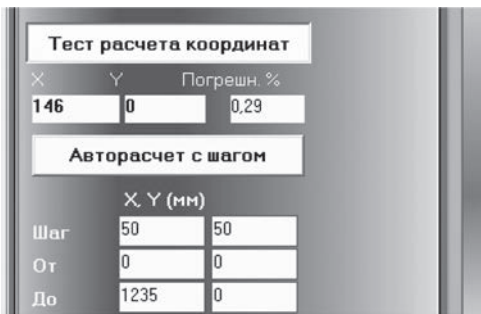
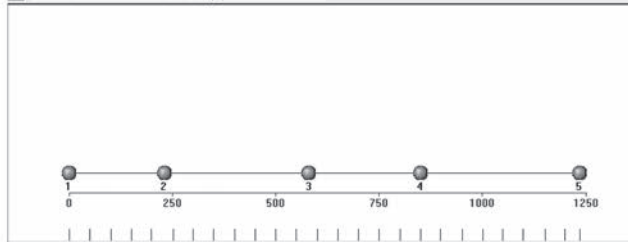


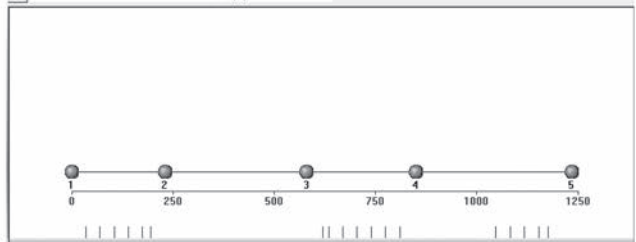
Рис. 2. Фрагмент окна испытаний программы EMA-3.9 с результатами ручного виртуального тестирования погрешности определения координат при линейной локации по формуле (1)

Антенна 1 – свободная линия



а

Антенна 1 – свободная линия



б

Рис. 3. Экран программы EMA-3.9 с результатами автоматического виртуального тестирования погрешности определения координат при линейной локации с шагом смещения источника 50 мм: а – скорости волн АЭ от источника и при расчете координат совпадают и равны 3,5 мм/мкс; б – скорость волн АЭ от источника 5 мм/мкс, при расчете координат 3,5 мм/мкс

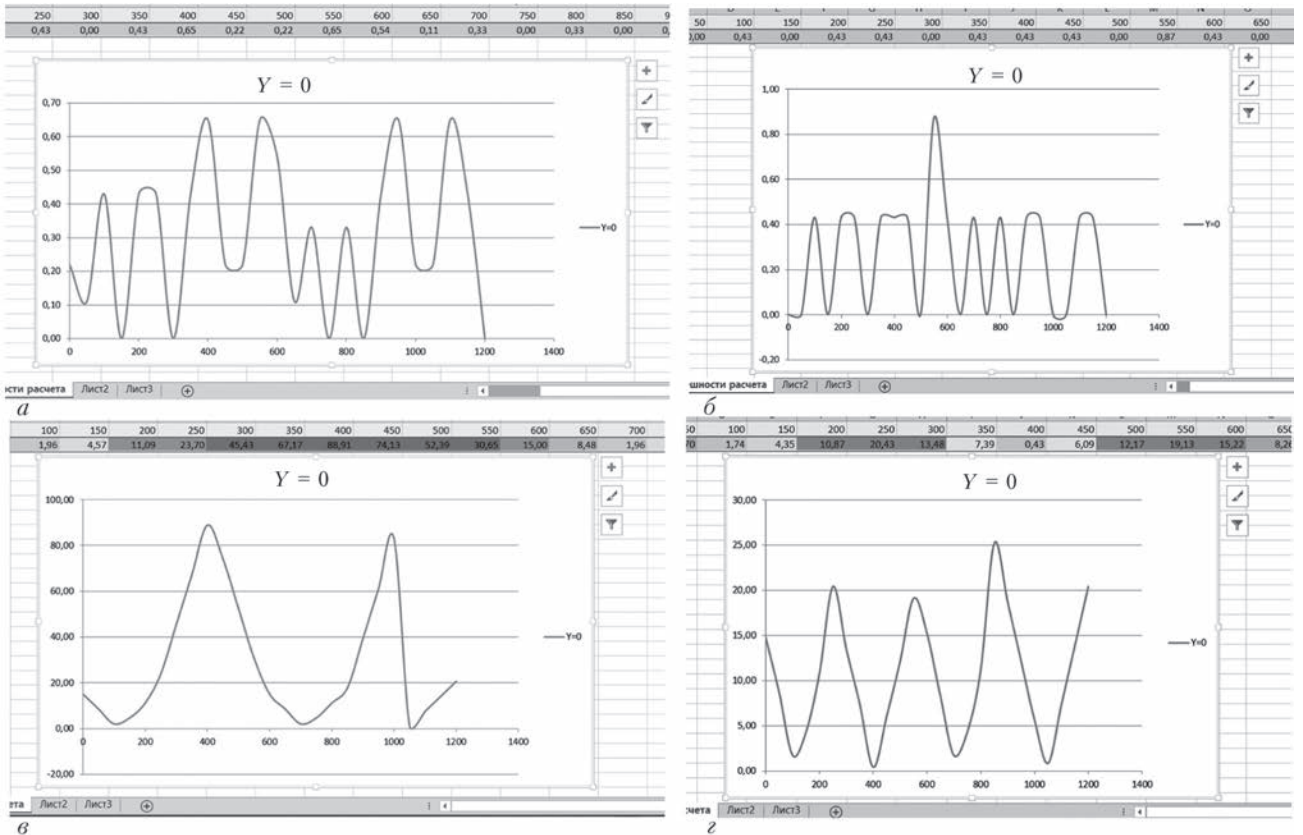


Рис. 4. Элементы рабочих листов Microsoft Excel с таблицами и графиками погрешности определения координат при линейной локации с шагом смещения источника 50 мм: а – скорости волн АЭ от источника и при расчете координат совпадают и равны 3,5 мм/мкс; б – скорость волн АЭ от источника 5 мм/мкс, при расчете координат 3,5 мм/мкс. Локация по формуле (1) (а, б); локация с использованием матрицы задержек из 1000 элементов (в, г)

расчетные координаты сравнивают с заданными и оценивают относительную погрешность [5], которая может меняться в пределах от 0 до 100 %. Для локационных антенн линейного типа это погрешность определения координаты X . Для плоскостных, цилиндрических и сферических антенн программа отображает большую из погрешностей при определении координат X и Y .

Рассмотрим вначале ручной режим тестирования. При его активации нажатием кнопки «Тест расчета координат» в области отображения локационной антенны появляется схематический виртуальный источник АЭ, который можно двигать мышью по экрану. Всплывающее сообщение показывает его текущие координаты по отношению к датчикам локационной антенны. Слева в полях вывода показываются расчетные координаты и

погрешность их определения. Пример, приведенный на рис. 2, демонстрирует результат определения координат при линейной локации. Для расчета координат в данном случае использовали так называемую простую формулу:

$$X = B/2 \pm C \Delta t/2, Y = B/2 \pm C \Delta t/2, \quad (1)$$

где C – скорость распространения звуковой волны в материале; Δt_{ij} – разность времен прихода волны на ближайшие к источнику пары датчиков, расстояние между которыми равно B .

Приведенный на рис. 2 источник АЭ имеет координату $X = 147$ мм, а расчетная координата X составляет 146 мм. Погрешность в данном случае равна 0,29 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности локации.

Ручной вариант тестирования удобен во многих случаях, но полную картину дает автомати-

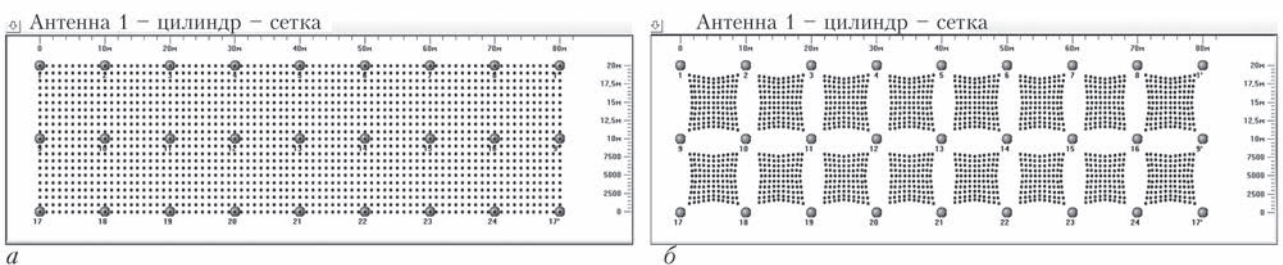


Рис. 5. Экран программы EMA-3.9 с результатами автоматического виртуального тестирования погрешности определения координат при локации на цилиндре с шагом смещения источника 100 мм: а – скорости волн АЭ от источника и при расчете координат совпадают и равны 3,5 мм/мкс; б – скорость волн АЭ от источника 5 мм/мкс, при расчете координат 3,5 мм/мкс

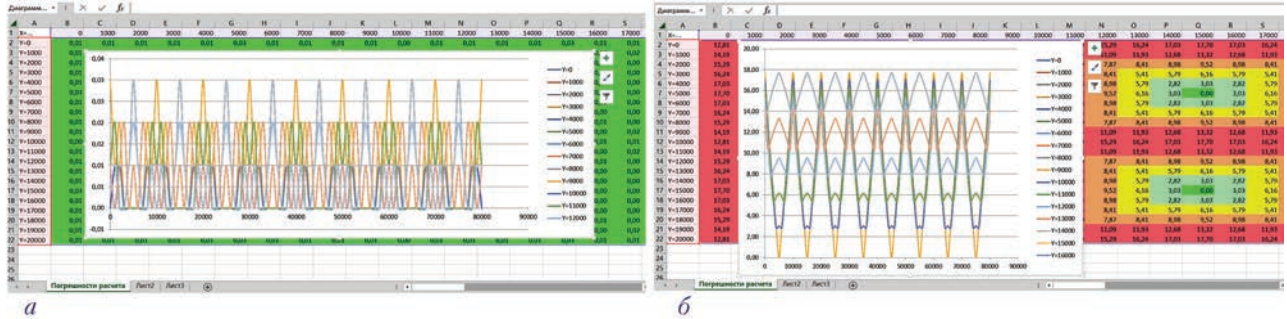


Рис. 6. Элементы рабочих листов Microsoft Excel с таблицами и графиками погрешности определения координат при локации на цилиндре с шагом смещения источника 100 мм: а – скорости волн АЭ от источника и при расчете координат совпадают и равны 3,5 мм/мкс; б – скорость волн АЭ от источника 5 мм/мкс, при расчете координат 3,5 мм/мкс. Локация по формуле окружностей [6]

ческий расчет, в котором можно задать диапазон координат, для которого выполняется проверка, и шаг перемещения источника. Вывод данных в виде таблиц и графиков Microsoft Excel позволяет наглядно увидеть распределение погрешностей локации по контролируемому участку. Таблицы содержат погрешности, расположенные по рядам с одной и той же координатой Y . Столбцы соответствуют одной и той же координате X . Количество строк и столбцов определяется заданным шагом по Y и X . Таким образом, при линейной локации все данные расположены в одном ряду таблицы, при двумерной – в нескольких. Графики содержат множественный набор линий, построенных для каждого ряда с общей координатой Y .

Для наглядности ячейки таблицы окрашиваются в зависимости от значения погрешности в цвета от зеленого до красного. Оттенки зеленого соответствуют погрешностям до 5 %, желтого – до 7,5 %, оранжевого – до 10 %. Ячейки, содержащие погрешности свыше 25 %, окрашиваются в ярко-красный цвет.

Отметим, что существенное значение для получения малых погрешностей имеет правильное задание скорости звуковых волн в материале [2, 3]. Ниже будет показано, что несоответствие реальной скорости звука той, которая задается при расчете координат, приводит к увеличению погрешностей определения координат в несколько раз и более.

На рис. 3 показаны результаты тестирования локации при линейном расположении датчиков АЭ с шагом смещения источника 50 мм для двух случаев. В первом случае скорость звука, заданная для виртуального эксперимента и для расчета координат, является одной и той же и составляет 3,5 мм/мкс. Во втором случае скорость звука для виртуального источника изменена до 5 мм/мкс. Несоответствие скоростей приводит к смещению расчетных координат, при-

чем весьма существенному. На экранах локации программы ЕМА-3.9 координаты источников АЭ показаны вертикальными черточками под схемой расположения датчиков. Как видим, на рис. 3, б их расположение совершенно не соответствует заданному шагу в 50 мм, в отличие от рис. 3, а, где представлены данные при совпадении заложеной в расчет координат и реальной скоростей.

Полученные данные наглядно демонстрируются таблицами и графиками Microsoft Excel. На рис. 4 приведены снимки рабочих листов с результатами расчета погрешностей для первого и второго случаев. Рис. 4, а, б соответствует расчету координат по формуле (1), рис. 4, в, г – расчету с применением так называемой матричной локации, при которой координату источника определяют по заранее теоретически рассчитанным временным

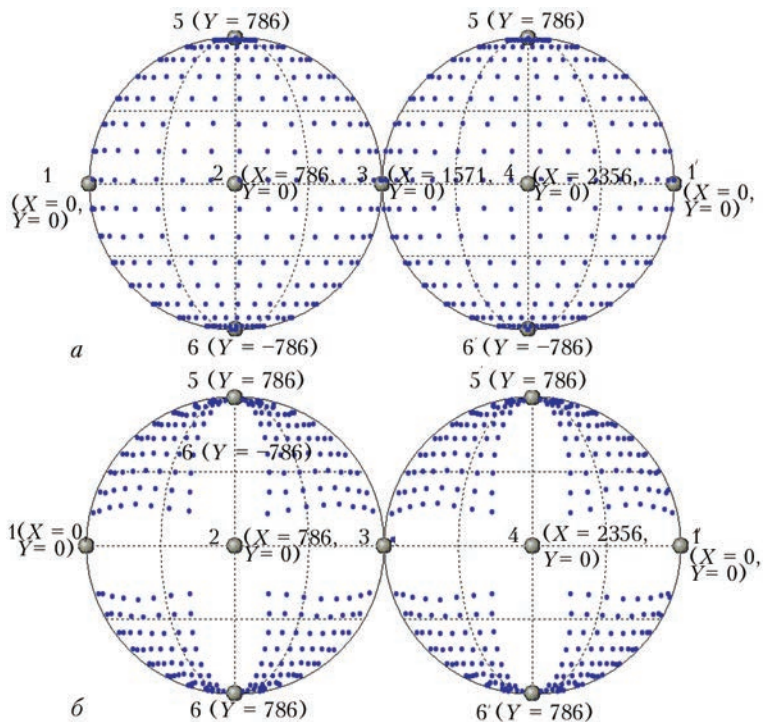


Рис. 7. Экран программы ЕМА-3.9 с результатами автоматического виртуального тестирования погрешности определения координат при локации на сфере с шагом смещения источника 100 мм вдоль экватора и по меридиану: а – скорости волн АЭ от источника и при расчете координат совпадают и равны 3,5 мм/мкс; б – скорость волн АЭ от источника 5 мм/мкс, при расчете координат 3,5 мм/мкс

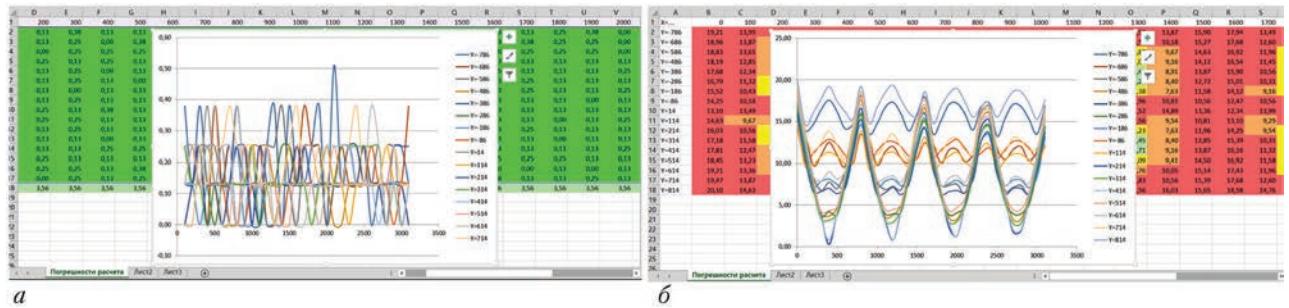


Рис. 8. Элементы рабочих листов Microsoft Excel с таблицами и графиками погрешности определения координат при локации на сфере с шагом смещения источника 100 мм вдоль экватора и по меридиану: а – скорости волн АЭ от источника и при расчете координат совпадают и равны 3,5 мм/мкс; б – скорость волн АЭ от источника 5 мм/мкс, при расчете координат 3,5 мм/мкс. Локация по формуле окружностей [6]

задержкам, из которых составлена матрица. Правильными считаются тот набор задержек и соответствующая ему координата источника, которые дают наименьшую невязку с данными, полученными при измерениях. Точность матричной локации одинакова для всей поверхности объекта и зависит от расстояния от источника до узла матрицы и шага, с которым задана матрица, а безразмерное действие обратно пропорционально количеству элементов матрицы.

Результаты работы обоих алгоритмов в данном случае вполне сопоставимы. При совпадении задаваемых и расчетных скоростей погрешность в обоих случаях не превышает 1 %, что является очень хорошим показателем. Матричный алгоритм показывает в целом меньшие погрешности, но есть отдельный выброс с большим значением.

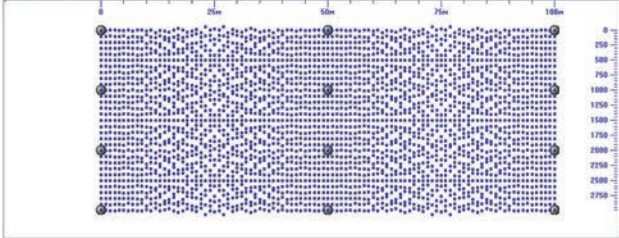
В случае же, когда скорость волн АЭ от источника равна 5 мм/мкс, а при расчете координат ее принимают равной 3,5 мм/мкс, погрешности увеличиваются во много раз. Интересно, что при этом матричная локация показывает намного луч-

шие результаты. Максимальная погрешность составляет 25 %, в то время как при расчете по формуле (1) она приближается к 90 %.

Полученные результаты типичны для локационных антенн линейного типа с произвольным размещением датчиков и для кольцевых антенн, отличающихся при расчете координат лишь необходимостью учета наличия замкнутого участка.

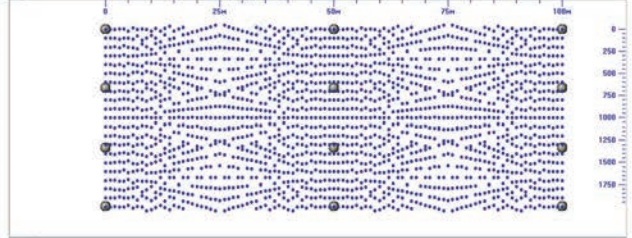
Прежде чем перейти к рассмотрению работы алгоритма тестирования применительно к двумерным поверхностям [5], отметим, что после его реализации в программе ЕМА-3.9 все используемые способы определения координат были проверены на предмет выявления случайных ошибок, которые трудно зафиксировать при реальных измерениях, когда в целом картина локации является адекватной, но возникают отдельные выбросы. Проведенное тестирование показало, что использованные ранее алгоритмы расчета координат в некоторых особых точках работали ошибочно, после чего они были скорректированы, что ранее было невозможно.

а) Антенна 1 – цилиндр горизонтальный – сетка



а

б) Антенна 1 – цилиндр горизонтальный – сетка



б

Рис. 9. Экран программы ЕМА-3.9 с результатами автоматического виртуального тестирования погрешности определения координат при локации на трубе длиной 100 м: а – диаметр трубы 1 м; б – диаметр трубы 0,666 м. Матричная локация



Рис. 10. Элементы рабочих листов Microsoft Excel с таблицами и графиками погрешности определения координат при локации на трубе длиной 100 м: а – диаметр трубы 1 м; б – диаметр трубы 0,666 м. Матричная локация



После коррекции все алгоритмы локации были проверены на точность. В результате проверки из программы были исключены алгоритмы расчета координат на двумерных поверхностях, основанные на модификациях формулы (1), как дававшие, в отличие от линейной локации, слишком большие погрешности. В качестве более точного расчетного алгоритма применили «метод пересекающихся окружностей» (далее «метод окружностей», «формула окружностей»), описанный, в частности, в работе [6]. В данном алгоритме на основании имеющихся данных по временным задержкам прихода сигнала на разнесенные датчики строится набор пересекающихся окружностей, координаты источника определяют из системы общих уравнений.

Таким образом, была выполнена унификация используемых алгоритмов определения координат. Для линейных и кольцевых типов антенн используются матричная локация или же основанная на формуле (1). Для плоскостных, цилиндрических и сферических антенн используются матричная локация или же метод окружностей. При правильном задании скоростей волн АЭ в материале их точность сопоставима и достаточно высока.

Рассмотрим для примера тестирование локации на двумерных объектах – цилиндре и сфере – с теми же начальными данными, что и при линейной локации, когда скорость волн АЭ от источника равна 3,5 мм/мкс, затем 5 мм/мкс, а при расчете координат 3,5 мм/мкс.

На рис. 5 показаны результаты тестирования для развертки цилиндра большого (80 м) диаметра и незначительной (2 м) высоты.

На цилиндре размещено 24 датчика АЭ с равномерным шагом в три ряда. Виртуальный источник смещали с шагом 100 мм. Использовали более быстрый, но менее точный расчет координат по формуле окружностей.

Как видим, в случае совпадения скоростей расчетные координаты перемещающегося источника определяются с очень высокой точностью, давая практически идеальную картину на экране. В случае несовпадения скоростей расчетные координаты равномерно смещаются к центру соответствующего квадранта. Полученные данные проанализированы с использованием таблиц и графиков Microsoft Excel. На рис. 6 приведены снимки рабочих листов с результатами расчета погрешностей для первого и второго случаев.

Согласно полученным результатам, при совпадении скоростей погрешность не превышает 0,03 %, при разных скоростях 18 %. Это значительно лучший результат, чем при линейной локации, а объяснен он может быть тем, что при двумерной локации в расчете координат учитыва-

ют временные задержки на 3 или 4 сработавших первыми датчиков, в отличие от 2 или 3 при линейной, что повышает точность. Отметим, однако, что при реальных АЭ испытаниях временные задержки далеко не всегда соответствуют теоретическим за счет сложных волновых процессов в материалах, в связи с чем конечная точность линейной и двумерной локации становится сопоставимой и реальные погрешности превышают теоретические.

Локация на плоскости в данной работе не рассматривается, поскольку является упрощенным вариантом локации на цилиндре, в котором не требуется учет замыкания поверхности, и выполняется с использованием тех же расчетных формул.

Рассмотрим далее тестирование локации на сфере.

На рис. 7 показаны результаты тестирования для развертки сферы диаметром 10 м. На сфере равномерно размещены 6 датчиков АЭ – 2 на полюсах и 4 на экваторе. Система координат выбрана меридиональная, датчики на экваторе имеют координату $U = 0$. Координата U источника АЭ соответствует широте и отсчитывается как расстояние в миллиметрах вверх и вниз от экватора с соответствующим знаком, координата X – долготы, и отсчитывается как расстояние в миллиметрах соответствующего меридиана от датчика № 1, отмеряемое по экватору против часовой стрелки. Виртуальный источник смещали с шагом 100 мм. Использовали точный расчет координат по формуле окружностей.

В данном эксперименте при совпадении скоростей расчетные координаты перемещающегося источника определяются с весьма неплохой точностью, что иллюстрирует рис. 7, а. В случае несовпадения скоростей расчетные координаты, как и при локации на плоскости, равномерно смещаются к центру соответствующего квадранта. Геометрически правильное размещение на рис. 7, б координат источников, определенных при неверном задании скорости звуковой волны, свидетельствует о том, что имеет место систематическая ошибка, при исправлении которой путем задания верного значения скорости координаты определяются правильно. Полученные данные проанализированы аналогичным предшествующему образом с использованием таблиц и графиков Microsoft Excel (рис. 8).

Точность локации на сфере несколько ниже, чем при локации на цилиндре. При совпадении скоростей погрешность не превышает 0,5 %, при разных скоростях 20 %. Это, тем не менее, как и в случае для цилиндра, значительно лучший результат, чем при линейной локации, по тем же причинам.

Таким образом, разработанная программа позволяет оценить погрешности различных алгорит-



мов расчета координат при линейной и двумерной локации. Рассмотрим ее применение в интересном прикладном аспекте. Значительное количество объектов АЭ контроля представляют собой протяженные конструкции или конструктивные элементы цилиндрической формы. К таким объектам относятся, в частности, балки, трубы, арматура, некоторые фермовые конструкции. Обычно для контроля таких объектов используют линейную локацию, находя только опасное сечение. Во многих случаях этого достаточно, но если требуется знать и вторую координату источника АЭ, его расположение по окружности сечения, то необходимо оценить точность определения обеих координат. Проблема состоит в том, что с изменением соотношения координат X и Y точность локации падает тем больше, чем больше оно отличается от 1.

Ниже показано, как при помощи виртуального тестирования доказать допустимость применения двумерной локации на трубе с расчетом координат по формуле для цилиндра. В качестве примера для расчета взяты два участка трубы длиной 100 м с диаметром 1 м и меньшим на треть – 0,666 м. Использовали для локации цилиндрические антенны горизонтального размещения из 9 датчиков, расположенных сеткой размером ячейки 50×1 м и $50 \times 0,666$ м соответственно. Два участка по длине трубы были сформированы, чтобы показать наличие для них одинаковой и симметричной картины размещения расчетных координат источника АЭ, что подтверждает, как уже говорилось выше, работоспособность алгоритма локации и систематичность ошибки. Проведено тестирование с шагом источника 1 м по оси X , т.е. вдоль образующей, и 100 мм по оси Y . Результаты тестирования приведены на рис. 9.

Как видим, уже при соотношении сторон ячейки локационной антенны 50 / 1 (рис. 9, а) возникают заметные визуальные отклонения расчетных координат источника АЭ от заданных. Для трубы с диаметром 0,666 м (рис. 9, б) эти отклонения значительно больше при той же тенденции – ближе к центру ячейки точность локации падает.

Оценим, насколько критичными являются погрешности в первом и втором случае. Допустимые погрешности при локации могут определяться разработчиком АЭ системы или же нормативными документами по ее применению в конкретных условиях. В любом случае погрешность свыше 10 % представляется нежелательной. Для трубы диаметром 1 м погрешность по координате Y величиной 10 % будет составлять около 30 см, что уже в принципе критично при точном поиске источника АЭ по сечению трубы. В то же время при проведении АЭ контроля могут быть иные соображения, определяющие требования к точности локации, зависящие от конкретных ус-

ловий и целей контроля. В данном случае погрешность определения координат более 10 % будем считать недопустимой.

На рис. 10 приведены снимки рабочих листов Microsoft Excel с результатами расчета погрешностей для первого и второго случаев. Для трубы диаметром 1 м (рис. 10, а) максимальная погрешность составляет 6,5 %, для трубы диаметром 0,666 м (рис. 10, б) 15 %. Таким образом, для используемой конфигурации локационной антенны соотношение длины участка трубы к ее диаметру более чем 50/1 приводит к нежелательным погрешностям при определении координат выбранным методом.

Аналогичным образом любой используемый тип локационной антенны, как и любой выбранный алгоритм расчета координат, могут быть эффективно протестированы до начала реального испытания.

В работе [2] авторы показали, что применительно к каждому конкретному объекту контроля должен быть применен индивидуальный подход, а решение об использовании того или иного алгоритма локации следует основывать на предварительном АЭ обследовании объекта, проводимом до начала его испытаний. Разработанная система тестирования позволяет реализовать указанный индивидуальный подход в вопросе расстановки датчиков АЭ, выбора метода расчета координат источников и обеспечения работы в пределах допустимой погрешности.

Выполненная работа представляется весьма полезной для автоматизации АЭ контроля, углубленного анализа АЭ данных, разработки и проверки новых алгоритмов и программ для обработки поступающей с объектов контроля информации, и является очередным этапом разработки интеллектуальных систем контроля [7].

Выводы

Разработанная система тестирования точности локации источников АЭ позволяет существенно упростить и сократить по времени процесс настройки АЭ испытаний, а также заранее оценивать достоверность расположения обнаруженных при реальных измерениях источников АЭ на определенных участках объекта контроля.

Созданная программа позволяет оценить диапазон скоростей звуковых волн для выбора оптимального варианта, который следует использовать при локации, что существенно повышает ее точность.

С помощью виртуального тестирования существующие и вновь создаваемые алгоритмы локации источников АЭ могут быть быстро проверены на точность и наличие ошибок и своевременно откорректированы.



1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
2. Недосека С. А., Овсиенко М. А. Особенности обработки данных акустической эмиссии для сложных и множественных локационных антенн // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2012. – № 2. – С. 7–12.
3. Недосека С. А., Недосека А. Я., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Там же. – 2011. – № 2. – С. 7–17.
4. Недосека А. Я., Бойчук О. И., Овсиенко М. А. К вопросу об оценке погрешности определения источников акустико-эмиссионной информации на линейных объектах // Там же. – 1999. – № 1. – С. 68–70.
5. Особенности распространения акустико-эмиссионных волн на поверхности трубно-оболочечных конструкций / А.Я. Недосека, М.А. Овсиенко, Л.Ф. Харченко, М.А. Яременко // Там же. – 2005. – № 2. – С. 24 – 27.
6. Грешиников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 273 с.
7. Опыт ИЭС им. Е.О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2012. – № 1. – С. 7–22.

The paper deals with the issues of improvement of AE monitoring methodology by solving the problem of prompt and operative assessment of possible errors at location of AE sources on objects of complex geometry. Assessment is performed with application of automated programmed virtual testing for pre-assigned configurations of location arrays. An indubitable advantage of the proposed solution is performance of evaluation before the start of transducer arrangement on the object that will allow selection of optimum schematics of their arrangement and the most suitable algorithm for AE source coordinate calculation. Performed work is useful for automation of AE monitoring, more profound analysis of AE data, development of new algorithms and programs of AE source location, and is one of the stages of development of intelligent monitoring systems.

Key words : AE monitoring, virtual testing, location accuracy, velocities of sound waves in materials.

Поступила в редакцию
07.20.2015

ММС100

7–10 June 2016,
Kyiv, Ukraine

www.medovar100.org



Международный симпозиум к 100-летию со дня рождения Б.И. Медовара

Дата проведения	7–10 июня 2016 г.
Тематика симпозиума	ЭШП и другие процессы специальной электрометаллургии, их научные основы, технологии и оборудование; электрошлаковое литье; сварка высоколегированных и высокопрочных сталей, а также аустенитных сталей и сплавов; теория кристаллизации сталей и сплавов; управление затвердеванием в металлургии и сварке; крупные кузнечные и листовые слитки; моделирование затвердевания в процессах специальной электрометаллургии и сварки; современные стали для магистральных газопроводов, сосудов давления, крупных поковок, роторов, валков; родственные области металлургии, сварки и металловедения.
Место проведения	Киев, Украина, Президент Отель
Организационный комитет	Тел.: +38(044) 287-52-18, +38(044) 337-30-81. Тел./факс: +38(044) 337-30-82 E-mail: org@medovar100.org , info@medovar100.org Дополнительная информация на сайте симпозиума www.medovar100.org

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОВРЕЖДЕННОГО ТРОЙНИКА

П. С. ЮХИМЕЦ

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

На основе результатов расчетов методом конечных элементов и измерений деформаций с помощью метода электро-тензометрии исследовано напряженно-деформированное состояние тройников, в том числе при наличии объемных поверхностных дефектов, расположенных в зонах конструктивной концентрации напряжений по контуру примыкания патрубка. Рассмотрено НДС соединительных элементов в зависимости от их геометрических параметров и условий закрепления. Получены данные о концентрации напряжений в зоне повреждения, ее зависимость от геометрических параметров дефекта и места его расположения. Проведены циклические гидравлические испытания натурального образца равнопроходного тройникового соединения с искусственно нанесенными объемными поверхностными дефектами и выполнено сопоставление фактической и расчетной долговечности. Библиогр. 11, табл. 6, рис. 6.

Ключевые слова: трубопроводы, тройниковое соединение, объемный поверхностный дефект, малоцикловая прочность, концентрация напряжений

Основным силовым воздействием при определении толщины стенок тройникового соединения, также как и прямолинейного участка трубопровода, является внутреннее давление [1]. Однако напряженно-деформированное состояние (НДС) тройника и прямой трубы существенно отличается. Это относится и к НДС в зоне объемных поверхностных дефектов (ОПД) указанных элементов трубопровода. Поскольку в процессе перекачки транспортируемого продукта трубопроводы подвергаются повторным нагрузкам [2], указанные особенности НДС в области ОПД, расположенных в зонах II, IV и V (рис. 1) рассматриваются в настоящей работе в связи с расчетно-экспериментальной оценкой прочности поврежденных тройников при циклическом изменении внутреннего давления. Характеристики НДС и циклической прочности тройника при расположении дефекта в зонах I и III представлены в работе [3].

Результаты исследования НДС тройника методом конечных элементов. Проведенные численные расчеты показали, что при нагружении

тройников одного типоразмера (426×20–168×9), но различной конструкции, минимальные напряжения возникают в тройнике с накладками, максимальные – в тройнике с приварным штуцером (табл. 1). Конструктивная концентрация напряжений достигает достаточно высоких значений и составляет в зависимости от типа тройника $\alpha_\sigma = 3,6 \dots 4,5$. Во всех случаях максимальные напряжения возникают на внутренней поверхности области сопряжения штуцера и трубы вдоль продольной оси тройника – в зоне II (см. рис. 1).

Установлено, что увеличение максимальных напряжений в тройнике происходит с увеличением диаметра патрубка, уменьшением его толщины и радиуса сопряжения трубы и патрубка. Наибольший рост напряжений отмечен при одновременном пропорциональном снижении толщины трубы и патрубка. В качестве примера в табл. 2 приведены данные, иллюстрирующие рост конструктивной концентрации напряжений в тройнике при увеличении диаметра патрубка.

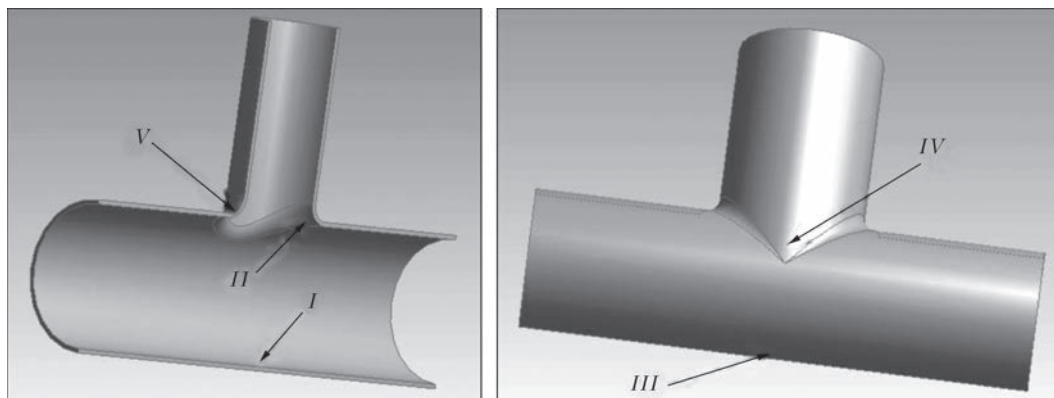


Рис. 1. Характерные зоны тройникового соединения (указаны стрелками)



Таблица 1. Максимальная интенсивность напряжения σ_i^{\max} на поверхности тройника при внутреннем давлении $P = 1$ МПа при локализации в зоне III

Тип тройника	σ_i^{\max} , МПа	α_σ	Примечание
ТУ 51-467-89 [4] (накладка)	31,4	3,6	–
ТУ 51-743-76 [5] (приварной штуцер)	39,4	4,5	Катет – 10 мм
ГОСТ 17376-2001 [6] (бесшовный)	36,5	4,2	Радиус сопряжения $R = 50$ мм

Примечание: α_σ – конструктивный коэффициент концентрации напряжений (ККН), определяемый как $\sigma_i^{\max}/\sigma_i^t$, где σ_i^t – интенсивность напряжений в трубе 426×20

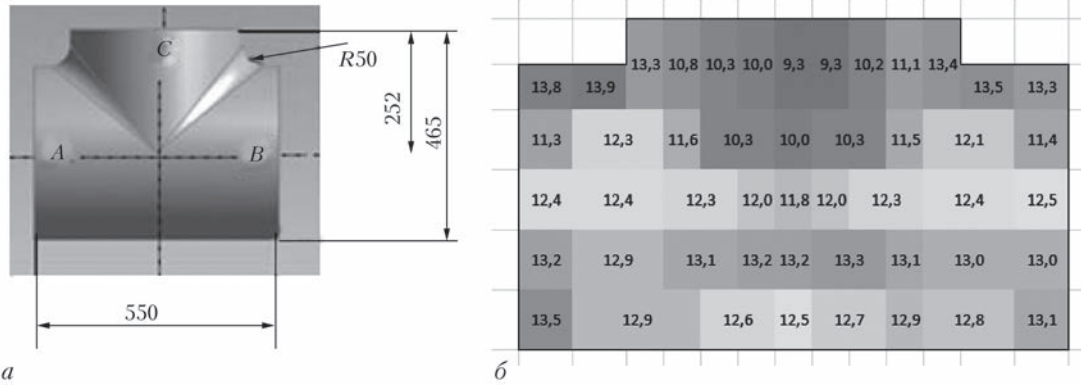


Рис. 2. Тройник 426×12–426×12: а – размеры; б – карта распределения толщин

Как следует из табл. 3, максимальные напряжения в дефекте, расположенном в зоне конструктивной концентрации напряжений тройника, возрастают с увеличением длины и глубины дефекта и уменьшением его ширины. Концентрация напряжений в дефектах, расположенных в указанных зонах равнопроходного тройника, в 2,5...3,7 раза превышает соответствующие значения для дефектов с теми же геометрическими параметрами в случае их расположения на прямой трубе.

Согласно полученным данным, схема закрепления концов тройника не оказывает значительного влияния на НДС зон конструктивной концентрации напряжений. Условия закрепления, реализованные в эксперименте (один из торцов трубы жестко защемлен), являются наиболее интенсивными – рост напряжений по сравнению с другими вариантами составляет $\approx 10\%$ как для зоны II, так и для зоны IV.

Экспериментальные исследования. Установленные зависимости ККН от геометрических параметров дефекта и места его расположения были использованы при изготовлении натурного образца для определения размеров искусственно нанесившихся ОПД, имитировавших коррозионные повреждения.

Таблица 2. Влияние диаметра патрубка на ККН

Тройник $R = 50$	α_σ		
	Зона II	Зона IV	Зона V
426×12-168×12	3,4	2,0	1,2
426×12-299×12	4,3	2,6	2,4
426×12-426×12	5,7	5,7	3,1

Примечание: α_σ – ККН, определяемый как $\sigma_i^{\max}/\sigma_i^t$, где σ_i^t – интенсивность напряжений в трубе 42×12

В качестве объекта исследования было использовано равнопроходное тройниковое соединение 426×12, размеры которого приведены в табл. 4 и на рис. 2, практически соответствуют требованиям нормативной документации. Как видим (рис. 2, б), формирование отвода при изготовлении тройника происходило за счет утонения его стенки.

Химический состав материала тройника, мас. %: 0,132 С; 0,188 Si; 0,40 Mn; 0,031 S; 0,024 P; 0,020 Cr; 0,039 Ni; 0,010 Cu.

Нанесение дефектов на поверхность тройника производилось электрохимическим методом. Геометрические параметры модельных дефектов приведены в табл. 5.

НДС натурного образца исследовали экспериментальным методом – с помощью тензометрирования и расчетным – с использованием МКЭ. При разработке схемы тензометрирования основное внимание было направлено на зоны дефектов и прилегающие области: монтаж тензорезисторов (измерительная база 3 мм) в зонах II, IV и V проводили в местах возникновения максимальных расчетных напряжений с учетом направления их действия, во всех случаях совпадавшего с направлением действия кольцевых напряжений в магистральной трубе (рис. 3).

На первом этапе давление создавалось посредством нагнетания внутрь образца сжатого воздуха. Таким образом обеспечивалось измерение деформаций с помощью тензорезисторов, находившихся на внутренней поверхности тройника – в зоне II. В дальнейшем статическое, а затем и циклическое нагружение в Лаборатории испытаний давлением ИЭС им. Е.О. Патона НАН Укра-

Таблица 3. НДС в зависимости от геометрических параметров ОПД в тройнике 426×12–426×12

Дефект, мм			Зона	σ_i , МПа	α_{σ} (МКЭ)	α_{σ}^T [7]	$\alpha_{\sigma}/\alpha_{\sigma}^T$
длина	ширина	глубина					
-	-	-	II	85,5	5,7	-	-
60	40	8	II	204,8	13,7	4,2	3,3
50	30	8	II	191,8	12,8	4,6	2,8
50	40	6	II	151,6	10,1	3,0	3,4
50	40	8	II	169,1	11,3	3,8	3,0
-	-	-	IV	84,6	5,7	-	-
40	50	8	IV	158,7	10,6	3,8	2,8
50	40	8	IV	167,3	11,2	3,8	2,9
50	30	8	IV	172,6	11,6	4,6	2,5
40	30	8	IV	170,3	11,4	4,1	2,8
40	50	6	IV	136,8	9,2	2,5	3,7
-	-	-	V	46,3	3,1	-	-
50	40	8	V	164,9	11,0	3,8	2,9
50	30	8	V	193,9	13,0	4,6	2,8
60	40	8	V	183,8	12,3	4,2	2,9
50	40	6	V	128,8	8,6	3,0	2,9

Примечания: 1. Длина дефекта в зонах II, V определяется его протяженностью вдоль дуги сопряжения трубы и патрубка, в зоне IV – вдоль оси трубы; 2. α_{σ}^T – значение ККН в ОПД на прямой трубе

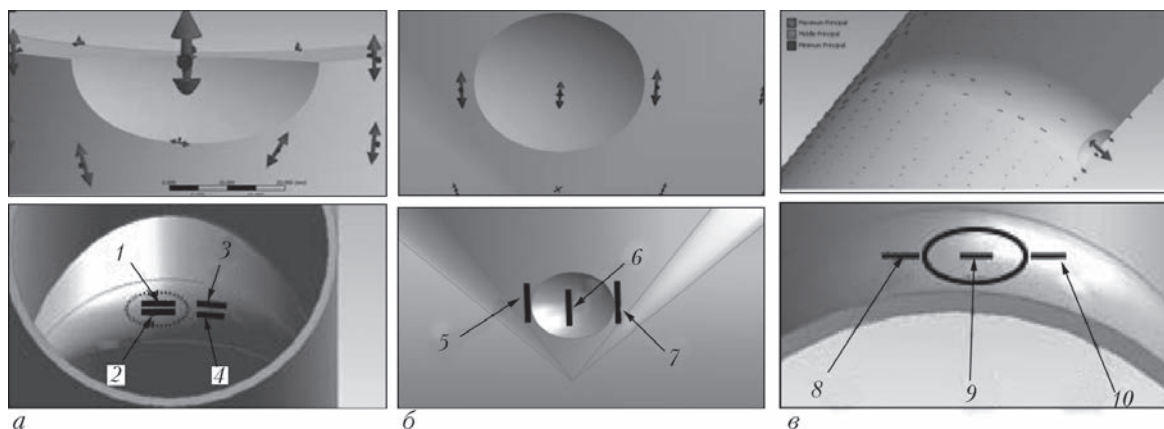


Рис. 3. Направление максимальных главных деформаций, а также расположение и нумерация тензорезисторов в дефектах (указаны стрелками): а – зона II; б – IV; в – V

ины, аккредитованной в системе УкрСЕПРО на техническую компетенцию (аттестат аккредитации UA 6.001 T306), проводили с использованием гидравлического оборудования.

Образец был подвергнут нагружению пульсирующим внутренним давлением 0,2...7,0 МПа с частотой 4–5 циклов в минуту. После наработки 3060 циклов произошла разгерметизация образца вследствие возникновения усталостной трещины в зоне II (рис. 4) и испытания были завершены.

Анализ результатов. Расчетные и измеренные величины максимальных деформаций в дефектах при давлении $P = 1$ МПа даны в табл. 5. Видно, что деформации в ОПД зоны II наибольшие. Расчетные деформации (МКЭ) превосходили экспериментальные величины: в ОПД зоны II – в 1,13 раза, в дефектах IV и V зоны – в 1,36 и 1,78 раза

соответственно. Указанные различия между расчетными и измеренными величинами являются, по-видимому, следствием упрощений, введенных при построении геометрической модели тройника.

Как следует из табл. 6, в случае расположения дефекта тех же размеров, что и модельный, на поверхности прямой трубы 426×12 концентрация напряжений α_{σ} , определявшаяся с помощью полуэмпирической зависимости [8]:

$$\alpha_{\sigma} = 1,4 \left[1 + \frac{2 \frac{b}{d} [1,12 - 0,48 \frac{b}{c} + 0,13 \frac{b}{c} (3 \frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h})]}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0,75 \frac{b}{c})} \times \sqrt{1 + \frac{5\pi\lambda^2}{32}} \right], \quad (1)$$

Таблица 4. Геометрические параметры тройника

DN400x12	t , мм	t_0 , мм	D_A , мм	D_B , мм	D_C , мм
ГОСТ 17376	10,2...15,6		426±3,0		
Фактические значения	9,6...13,8	9,8...13,2	426...427	426	429

Примечание: D_A-D_C – наружные диаметры торцов тройника (см. рис. 2); t – толщина стенки на торцах тройника; t_0 – толщина стенки тройника в зоне сопряжения магистрали и отвода

Таблица 5. Размеры дефектов и максимальные деформации в них

Место расположения	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм	$\epsilon_{i \max} \cdot 10^4$ (эксперимент)	$\epsilon_{i \max} \cdot 10^4$ (МКЭ)	$\frac{\epsilon_{i \max} \text{ (МКЭ)}}{\epsilon_{i \max} \text{ (эксперимент)}}$
Зона II	43	27	7,10	7,7	8,7	1,13
Зона IV	48	39	7,07	5,8	7,9	1,36
Зона V	35	55	8,70	4,0	7,1	1,78

где b, c, d – размер полуосей эллипсоида, описывающего дефект; h – толщина стенки; λ – функция, учитывающая кривизну поверхности:

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{Rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2}$$

(R – радиус трубы; μ – коэффициент Пуассона) оказалась существенно ниже как экспериментальных $\alpha_{\sigma\epsilon}$ (в 2,2...2,9 раза), так и расчетных $\alpha_{\sigma\text{МКЭ}}$ значений ККН в дефектах на поверхности тройника. Коэффициенты концентрации напряжений $\alpha_{\sigma\epsilon}$, полученные экспериментально, во всех случаях оказались ниже, чем рассчитанные МКЭ.

Значение полного коэффициента концентрации напряжений в дефекте тройника α_p , определявшегося как произведение ККН в прямой трубе $\alpha_{\sigma t}$ и конструктивного ККН в тройнике (МКЭ), превышают экспериментальные значения ККН в дефектах в 1,4...2,2 раза (см. табл. 6). В то же время величина полного коэффициента концентрации α_p , определявшегося с использованием конструктивного ККН $\alpha_{\sigma k2}$, находившегося согласно [9], имеет более близкое к экспериментальным значениям ККН – превышение составляет 1,2...1,5 раза. Отметим, что при расчете α_p величина конструктивного ККН во всех рассматриваемых зонах в запас прочности принималась такой же, как и в зоне II.

Максимальные экспериментальные деформации на поверхности дефектов в упругой области нагружения возникали в порядке убывания в зонах II, IV и V. Этот же порядок соответствует



Рис. 4. Разрушение натурального образца в зоне II

расчету МКЭ (рис. 5). В пластической области деформирования (при давлении свыше 3,5 МПа) экспериментальные деформации в вершине дефекта зоны V превысили максимальные деформации зоны IV.

На рис. 6 приведены расчетные [10] и экспериментальные усталостные кривые материала характерных зон тройника (данные механических испытаний материала тройника, а также испытаний стандартных образцов при жестком нагружении предоставлены А.П.Гопкало, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ). Как видно, кривые зоны IV расположены достаточно близко, при этом в области числа циклов до разрушения $N_f < 2 \cdot 10^3$ более консервативной является экспериментальная кривая, в области $N_f > 2 \cdot 10^3$ – расчетная. Расчетные кривые зон II, V в диапазоне $N_f = 10^3 \dots 10^4$ занижают значение чисел циклов до разрушения по сравнению с экспериментальными данными приблизительно в 5 раз. Числа циклов N_p опре-

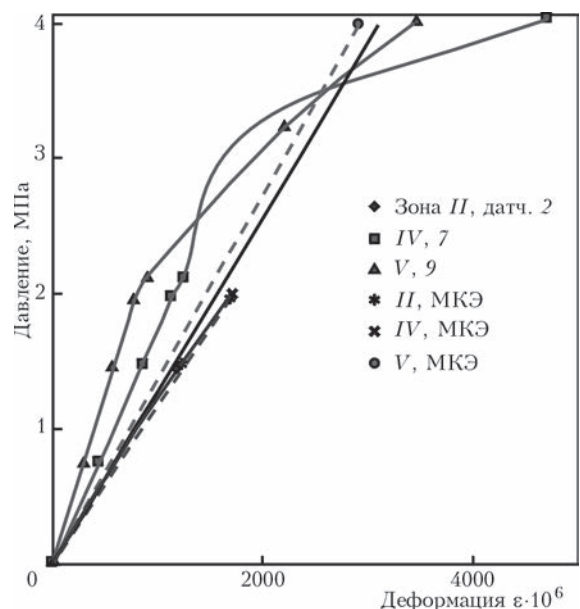


Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных деформаций в дефектах



Таблица 6. Концентрация напряжений в дефектах

Место расположения дефекта	$\alpha_{\sigma t}$	$\alpha_{\sigma e}^*$	$\alpha_{\sigma MKO}^*$	$\frac{\alpha_{\sigma e}}{\alpha_{\sigma t}}$	$\alpha_{\sigma k}$	$\alpha_{\sigma k2}$	$\alpha_{\Gamma} = \alpha_{\sigma \Gamma} \cdot \alpha_{\sigma k}$	$\alpha_{\Gamma 2} = \alpha_{\sigma t} \alpha_{\sigma k2}$	$\frac{\alpha_{\sigma f}}{\alpha_{\sigma e}}$	$\frac{\alpha_{\sigma f/2}}{\alpha_{\sigma e}}$
Зона II	4,1	11,8	13,4	2,9	5,7	3,4	23,4	13,9	2,0	1,2
Зона IV	3,4	8,9	12,2	2,6	5,7		19,4	11,6	2,2	1,3
Зона V	2,8	6,2	10,9	2,2	3,1		8,7	9,5	1,4	1,5

Примечания: * концентрация напряжений по отношению к интенсивности деформаций в прямой трубе 426×12; $\alpha_{\sigma k}$ – коэффициент конструктивной концентрации напряжений (см. табл. 3); $\alpha_{\sigma k2}$ – коэффициент конструктивной концентрации напряжений согласно [9]

делённые по экспериментальной кривой зон I, III почти в 3 раза ниже расчетных. Возможной причиной того, что в данной зоне более консервативной оказалась экспериментальная кривая, может быть развитие в процессе циклического нагружения микротрещин, выявленных в Институте проблем прочности при металлографическом анализе образцов материала из этой зоны и является, как можно предположить, следствием нарушения технологии термообработки тройника.

Для построения расчетных усталостных кривых использовано выражение

$$\epsilon_a = \left[\frac{\ln\left(\frac{1}{1-\Psi}\right)}{4e_t N_f^n} + \frac{\sigma_1}{\sigma_t} \right] e_{ii}$$

где ϵ_a – интенсивность амплитуды деформаций в цикле нагружения; Ψ – относительное сужение шейки при разрыве; e_t – деформация предела текучести; n – число циклов до разрушения; σ_1 – предел усталости материала; σ_t – предел текучести; e_{ii} – интенсивность деформаций, соответствующая пределу текучести; n – показатель степени, $n = 0,5$.

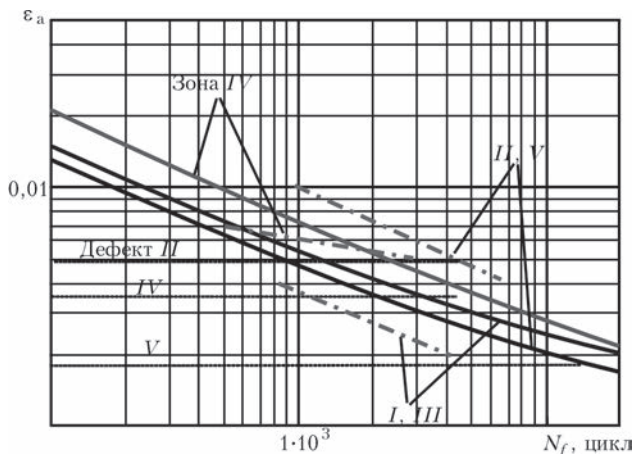


Рис. 6. Усталостные кривые: штрихпунктирные линии – экспериментальные (по данным, предоставленным А.П. Гопкало); линиями в виде точек отмечены уровни максимальных деформаций в дефекте; сплошными линиями – расчетные

С использованием полученных экспериментальных данных была выполнена оценка воздействия модельных дефектов на долговечность натурного образца. Расчет амплитуды максимальной деформации в дефекте проводили на основании максимальных экспериментальных деформации и ККН в упругой области нагружения, а также механических свойств соответствующей зоны тройникового соединения с использованием интерполяционного соотношения для коэффициента уругопластических деформаций [11]:

$$K_e = \frac{\alpha_{\sigma}^{2/(1+m)} (\bar{\sigma}_n)^{(1-m)/(1+m)}}{(\alpha_{\sigma} \bar{\sigma}_n)^{n/(1+m)} \left[1 - \left(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_{\sigma} \right) \right]}$$

где $\bar{\sigma}_n$ – относительные номинальные напряжения в цикле нагружения; $\bar{\sigma}_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma_y}$; n – постоянная материала, $n = 0,5$; m – коэффициент упрочнения материала в уругопластической области.

Фактическое число циклов до разрушения дефекта натурного образца в зоне II $N_{f,ex} = 3060$ удовлетворительно соотносится с результатами прогноза с использованием экспериментальной усталостной кривой (рис. 6) $N_{f,pr} \approx 4400$ циклов – накопленное повреждение $d = N_{f,ex}/N_{f,pr} \approx 0,70$. Ожидаемое число циклов до разрушения согласно экспериментальным кривым в дефектах IV и II – $N_f \approx 10^4$ и $N_f \approx (3...4) \cdot 10^4$ соответственно.

Выводы

Экспериментально установлено, что деформации, возникающие в объемных поверхностных дефектах, расположенных в зонах конструктивной концентрации напряжений тройникового соединения под действием внутреннего давления в 2-3 раза выше деформации в дефектах с такими же геометрическими параметрами на поверхности прямой трубы.

Число циклов до разрушения натурного образца согласуется с оценкой его долговечности, основанной на экспериментальном и расчетном



исследовании НДС и циклических свойствах конструкционного материала.

1. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. – 2000.
2. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении / М.И. Волский, А.С. Аистов, А.П. Гусенков, Л.К. Гуменный // Обзорная информация. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1979. – С. 56–58.
3. Юхимец П. С., Кобельский С. В., Филипенков В. В. Циклическая прочность поврежденного тройникового соединения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 2. – С. 34–38.
4. ТУ 51-467–89. Детали трубопроводов стальные приварные. Технические условия.
5. ТУ 51-743–76. Тройники сварные из труб на давление P_y 16 МПа.
6. ГОСТ 17376–2001. Тройники бесшовные приварные.
7. Гарф Э. Ф., Кобельский С. В., Юхимец П. С. Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов // Автомат. сварка. – 2000. – № 6. – С. 3–6.
8. Фокин М. Ф., Трубицын В. А., Никитина Е. А. Оценка эксплуатационной долговечности магистрального нефтепровода в зоне дефекта / Обзорная информация. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – С. 52–54.
9. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
10. Серенсен С. В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
11. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

Results of finite element calculation and deformation measurement by the method of electrotenometry were used to study the stress-strain state of T-joints, in particular in the presence of volume surface defects, located in the zones of structural stress concentration around the contour of branch pipe attachment. Connecting element SSS is considered, depending on their geometrical parameters and fastening conditions. Data were obtained on stress concentration in the damage zone, its dependence on defect geometrical parameters and location. Cyclic hydraulic testing of full-scale sample of flush T-joint with artificially introduced surface defects was performed, and actual and design fatigue lives were compared.

Keywords: pipelines, T-joint, volume surface effect, low-cycle fatigue strength, stress concentration

Поступила в редакцию
14.05.2015

Международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ»
13–15 июня 2016 г.
Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Тематика конференции:

- ◆ электронно-лучевая сварка
- ◆ лазерная сварка
- ◆ гибридные процессы сварки
- ◆ сварка трением с перемешиванием
- ◆ контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей
- ◆ сварка дугой, вращающейся в магнитном поле
- ◆ 3D аддитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах

Организационный комитет:
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
03680, г. Киев, ул. Боженко 11, тел./факс: +38(044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com
www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016
www.patonpublishinghouse.com



КАРТОГРАФУВАННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ РЕЄСТРАЦІЇ ЗВОРОТНЬО-РОЗСІЯНОГО УЗ СИГНАЛУ

В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, В. В. КОШОВИЙ, М. М. СТУДЕНТ, Р. І. РОМАНИШИН, І. М. РОМАНИШИН,
В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, П. М. СЕМАК, Р. В. ШАРАМАГА

Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79053, м. Львів-53, вул. Наукова, 5. E-mail: pminasu@lviv.ua

Запропоновано неруйнівний метод визначення адгезійної міцності газотермічного покриття по поверхні товстостінного виробу на основі реєстрації зворотньо-розсіяного УЗ сигналу у вигляді А-скану. Викладені фізичні основи методу, ультразвукова технологія для його реалізації та результати експериментальної апробації для зразків з газотермічним покриттям. Бібліогр. 7, рис. 6.

Ключові слова: адгезія, УЗ зворотньо-розсіяний сигнал, статистична обробка

Для вимірювання адгезії найбільш поширеними є механічні методи, які зводяться до вимірювання сили або роботи, які необхідно прикласти, щоб відірвати покриття одиничної площі [1, 2]. Такі методи є руйнівними. Крім того, вони не дозволяють визначати адгезію між окремими шарами в багатошарових матеріалах.

До перспективних неруйнівних методів оцінювання адгезії належать УЗ методи [3–5].

Найпростіший УЗ метод виявлення відшарувань покриття від основи [4] базується на тому, що при поширенні УЗ хвиль через матеріали з різним акустичним імпедансом частина енергії відбивається від поверхонь розділу цих матеріалів. Якщо покриття в окремих місцях має відшарування від основи, то від цих відшарувань УЗ хвилі будуть відбиватися і у зареєстрованому сигналі (на екрані осцилографа) буде спостерігатися сигнал, відбитий від відшарування.

Відомий неруйнівний УЗ метод контролю адгезійних зв'язків між тонкими металевими листами порядку 0,8 мм [5]. Цей метод базується на імпульсному УЗ зондуванні об'єкту контролю з поверхні металу, реєстрації багатократно відбитого від границі метал–адгезійний шар УЗ сигналу (часової реалізації А-скану), обчисленні відношення між кожними двома послідовно відбитими сигналами. Це відношення визначається коефіцієнтом відбивання від границі метал–адгезійний шар і на його основі оцінюють адгезійне зчеплення.

В даній роботі запропоновано новий неруйнівний метод картографування адгезійної міцності покриття на основі сканування поверхні об'єкту прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу

(«структурного шуму») у вигляді А-скану [6] у багатьох точках сканування, статистичній обробці зареєстрованих сигналів, визначенні місць відшарувань покриття від основи та побудови просторового розподілу адгезійної міцності покриття. Фізичною основою такого підходу є залежність інтенсивності зворотньо-розсіяного сигналу від адгезійної міцності покриття (якості адгезії), що дає можливість визначати місця відшарувань. Картографування адгезійної міцності покриття проводять на основі інформації про місця відшарувань та тарування відносної площі відшарувань до адгезійної міцності покриття.

Фізичні принципи методу. Адгезійна міцність (Па) визначається силою зчеплення покриття одиничної площі до підкладки [1, 2]. Тому методи визначення адгезійної міцності зводяться до вимірювання сили, яку необхідно прикласти до покриття одиничної площі, щоб відірвати це покриття від підкладки (основи). Інший підхід зводиться до визначення роботи, яку необхідно виконати, щоб відірвати покриття одиничної площі. Обидва ці методи руйнівні.

Адгезійна міцність газотермічного покриття залежить від відношення площі відшарувань T до площі покриття S і визначається за формулою

$$C = C_0 \left(1 - \frac{T}{S} \right), \quad (1)$$

де C_0 – адгезійна міцність покриття при відсутності відшарувань (визначається експериментально за допомогою еталонного зразка або із довідників). Задача зводиться до визначення місць і площі відшарувань.

Обґрунтування використання зворотньо-розсіяного сигналу для визначення наявності відшару-

вання. Коефіцієнт відбивання УЗ сигналу від границі двох середовищ визначається відмінністю імпедансів цих середовищ. При нормальному падінні УЗ хвилі на границю двох середовищ коефіцієнт відбивання рівний:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

де Z_1, Z_2 – імпеданси середовищ (з якого і на яке падає хвиля відповідно; теоретично середовище, на яке падає хвиля, повинно бути напівбезмежне).

Визначення місця відшарування. При зондуванні об'єкта з покриттям повздовжньою хвилею прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем зворотньо-розсіяний УЗ сигнал залежить від якості адгезії між покриттям і підкладкою. В місцях з відшаруванням інтенсивність зворотньо-розсіяного сигналу вища. Тому на першому

етапі поверхня об'єкту з покриттям сканується прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем по сітці, реєструються та аналізуються зворотньо-розсіяні УЗ сигнали у вигляді А-скану в багатьох точках на поверхні сканування (рис. 1).

На другому етапі за результатами аналізу сигналів, зареєстрованих в багатьох точках на поверхні сканування, визначаються місця з відшаруванням і будується карта адгезійної міцності.

На рис. 2 приведено зразок (зліва) та типові приклади зареєстрованих сигналів при імпульсному зондуванні плоскопаралельного виробу прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, зареєстровані в декількох точках на поверхні зразка.

Слід відмітити, що в часовій реалізації А-скану, зареєстрованій прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, можна виділити кілька ділянок, а саме: зондуєчий імпульс; імпульс, відбитий від границі призма-метал; перший донний відбитий імпульс, другий донний відбитий імпульс, а також ділянку між зондуєчим імпульсом та імпульсом, відбитим від границі призма-метал, та інформативну частину для оцінювання ступеня адгезії – зворотньо-розсіяний сигнал – ділянку між імпульсом, відбитим від границі призма-метал, і першим донним відбитим імпульсом. На рис. 2 цій ділянці відповідає часовий проміжок від моменту часу US Enter до моменту Bottom Signal, тобто сигнал в межах цього проміжку є зворотньо-розсіяним і несе інформацію для оцінювання ступеня адгезії в даній точці реєстрації.

На рис. 2 приведено чотири реалізації сигналів, які є частинами А-сканів, зареєстрованих в різних точках на поверхні зразка, і містять зворот-

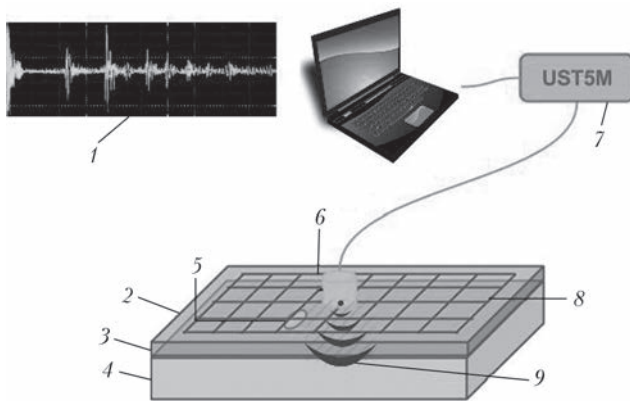


Рис. 1. Схема реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу: 1 – А-скан; 2 – газотермічне покриття; 3 – адгезійне покриття; 4 – підкладка; 5 – відшарування; 6 – УЗ-перетворювач; 7 – УЗКТ UST5M; 8 – сітка сканування; 9 – поширення УЗ хвилі

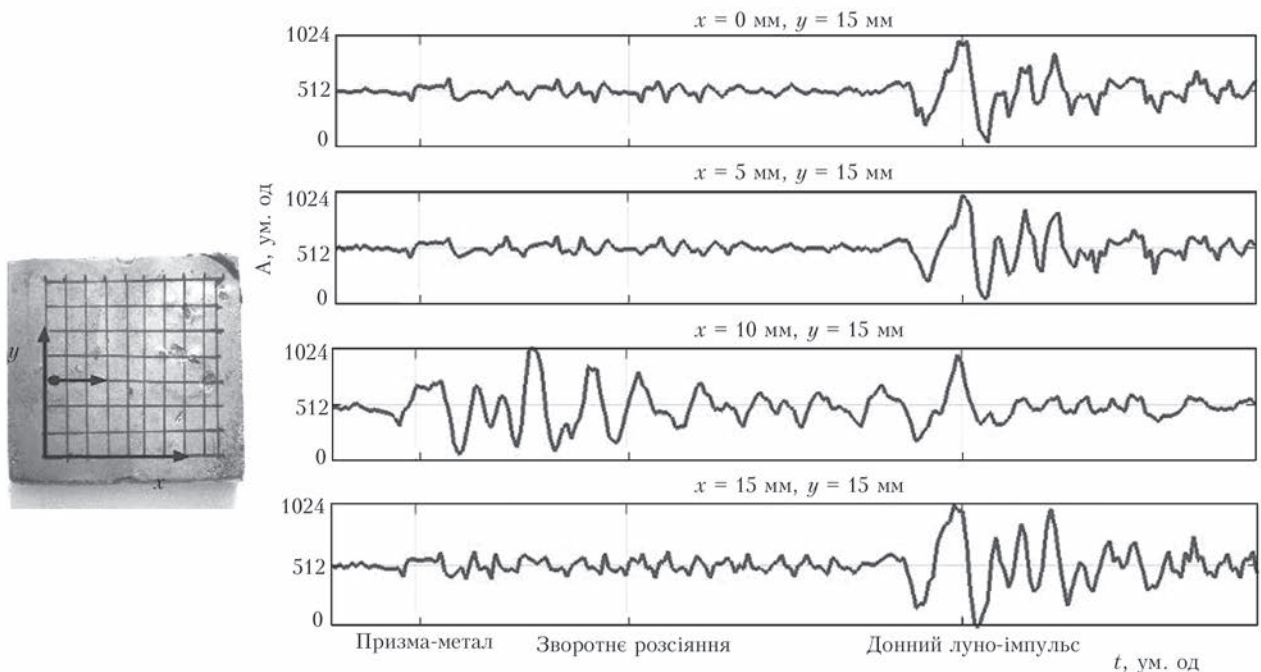


Рис. 2. Типові приклади зареєстрованих сигналів



ньо-розсіяний сигнал та донний відбитий сигнал. Як бачимо, реалізація, зареєстрована в положенні ($x = 10$ мм, $y = 15$ мм), якісно відрізняється від інших трьох. Як виявилось (в результаті обробки зареєстрованих сигналів), це положення відповідає місцю відшарування.

На рис. 3 приведено найпростіші моделі об'єкта з покриттям та типові реалізації зворотньо-розсіяного сигналу у випадку наявності відшарування (зліва) та при добрій адгезії (справа).

Основною проблемою УЗ контролю є вплив акустичного контакту. Для врахування впливу акустичного контакту і забезпечення співстави-

мости реалізацій, зареєстрованих в різних точках поверхні, проводиться нормування інтенсивності зареєстрованого сигналу.

Обчислюється дисперсія пронормованої інформативної частини сигналу. Будується гістограма дисперсій за результатами зареєстрованих сигналів в багатьох точках поверхні сканування. Експерименти засвідчили, що при відсутності відшарувань гістограма має вигляд релівського розподілу. Знаходиться границя зміни дисперсій (реперне значення) для випадку, коли відшарувань немає. Експерименти засвідчили, що у випадку наявності відшарування значення дисперсії сигналу в рази перевищує це реперне значення, тобто дисперсію, коли відшарування немає. Таким чином визначаються місця наявності відшарувань.

Картографування адгезійної міцності. Проводиться розбиття поверхні сканування на елементарні ділянки. Розміри елементарної ділянки вибирають, виходячи з кроку сканування, апріорних даних про розміри відшарувань, необхідної роздільної здатності. Обчислюється площа кожної елементарної ділянки S та площа відшарувань T в межах цієї ділянки. За формулою (1) обчислюється адгезійна міцність для цієї ділянки. Будується карта адгезійної міцності $C(x, y)$.

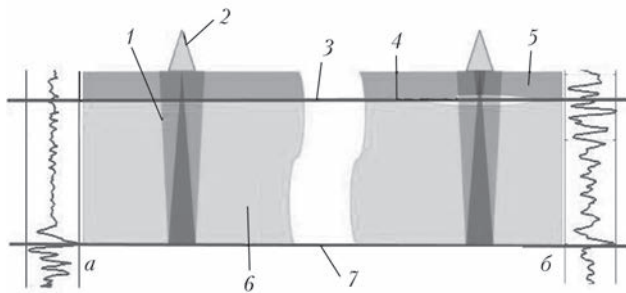


Рис. 3. Модель об'єкта з покриттям при наявності відшарування (а) та при добрій адгезії (б): 1 – поширення хвилі; 2 – УЗ-перетворювач; 3 – адгезійне покриття; 4 – відшарування; 5 – газотермічне покриття; 6 – підкладка; 7 – внутрішня поверхня

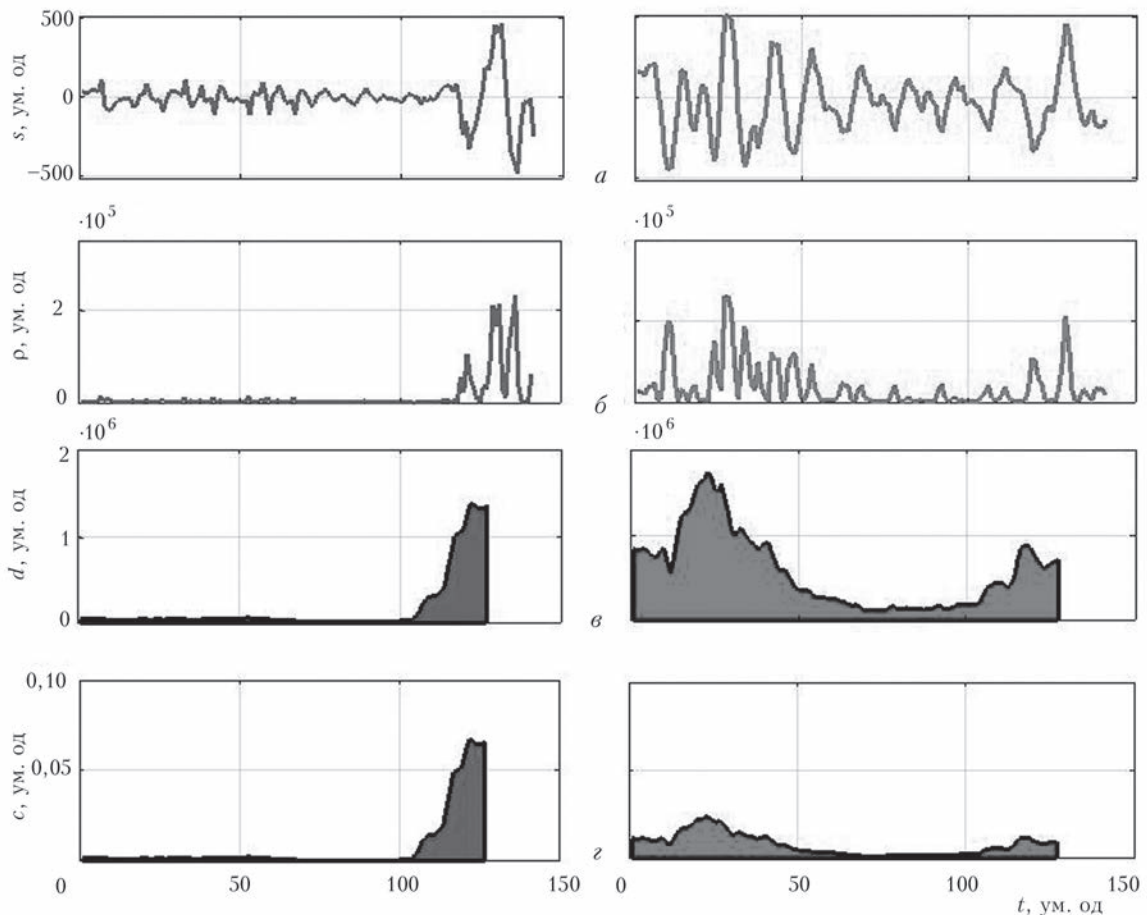


Рис. 4. Обробка зворотньо-розсіяного сигналу (зліва – без відшарування, справа – з відшаруванням)



Інформаційна технологія обробки зворотньо-розсіяного УЗ сигналу. УЗ технологія картографування адгезійної міцності полягає в наступному.

Проводиться розбиття поверхні об'єкта контролю на сітку – елементарні пікселі (рис. 2, зліва).

Проводиться покрокове сканування поверхні об'єкта контролю та УЗ імпульсне зондування повздовжніми УЗ хвилями прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем.

На кожному кроці сканування проводиться реєстрація часової реалізації зворотньо-розсіяного УЗ сигналу у вигляді А-скану.

Інформаційна технологія обробки часової реалізації зареєстрованого УЗ сигналу у вигляді дискретних відліків А-скану полягає в наступному (рис. 4).

1. Нехай в точці сканування (x, y) зареєстрована реалізація $s(x, y) = \{s(n; x, y), n = 1, \dots, N\}$ $s(n; x, y)$ – n -й відлік, N – загальна кількість відліків).

Інформативною частиною сигналу про стан матеріалу по товщині є ділянка сигналу від кінця імпульсу, відбитого від границі призма–метал, до початку першого донного відбитого сигналу (рис. 4, а).

2. Виділяємо інформативну частину сигналу $s_i(x, y) = \{s(n; x, y), n = N_1, \dots, N_2\}$ (N_1 – номер відліку кінця імпульсу, відбитого від границі призма–метал, N_2 – номер відліку початку першого донного відбитого сигналу). Отримуємо реалізацію інтенсивності

$$p(x, y) = \{p(n; x, y) = s^2(n; x, y), n = N_1, \dots, N_2\}.$$

Реалізація інтенсивності – шумоподібний RF-сигнал (рис. 4, б).

3. Проводимо детектування інтенсивності шляхом усереднення в біжучому вікні тривалістю одного періода несучої

$$d(x, y) = \left\{ d(n; x, y) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{k=n-\Delta+1}^{n+\Delta} s^2(k; x, y), \right. \\ \left. n = N_1, \dots, N_2 + \Delta_{imp} \right\},$$

де $\Delta = \text{Int}(F/f)$; f – частота зонduючого сигналу; F – частота дискретизації; Δ_{imp} – тривалість зонduючого імпульсу (кілька періодів несучої), яка визначається на основі відбитого донного сигналу (рис. 4, в).

Важливо відзначити два моменти цієї процедури з точки зору статистичної обробки шумоподібного сигналу.

По-перше, приведене детектування є обчисленням автокореляційної функції шумоподібного модульованого сигналу при нульовій затримці і є нормованою (усередненою по числу відліків) енергією сигналу [7].

По-друге, відомо, що при обчисленні автокореляції синусоїдальної функції на основі скінченного числа даних виникає похибка із-за скінченності числа даних. В цьому випадку для синусоїдального сигналу автокореляцію можна представити у вигляді двох складових: «правильної» автокореляції (як такої, що отримується на основі нескінченного числа даних) та «похибки», яка виникає через «урізання» даних [7]. Ця складова рівна нулю, коли інтервал, на основі якого обчислюється «урізана» автокореляція, співпадає або кратний періоду синусоїдального сигналу.

Таким чином, усереднення інтенсивності на періоді несучої забезпечує практично відсутність похибки автокореляції через «урізання» даних.

4. Обчислюємо енергію сигналу на проміжку

$$N_1 - \Delta_{imp} \div N_2 + \Delta_{imp} \quad E = \sum_{n=N_1-\Delta_{imp}}^{N_2+\Delta_{imp}} d(n; x, y) \text{ і нор-}$$

муємо кожний відлік інтенсивності до цієї величини

$$c(x, y) = \left\{ c(n; x, y) = \frac{d(n; x, y)}{E}, n = N_1, \dots, N_2 \right\}.$$

В результаті такого нормування отримуємо реалізацію інтенсивності зворотньо-розсіяного сигналу, яка має одиничну енергію на проміжку нормування з врахуванням енергії відбитого донного сигналу (рис. 4, з).

За допомогою цієї процедури позбавляємось впливу контакту та підсилення приймального тракту.

5. Враховуємо вплив загасання сигналу по шляху зондування внаслідок розсіювання:

$$r(x, y) = \left\{ r(n; x, y) = \frac{c(n; x, y)}{1 - \sum_{i=N_1}^{N_1+n-1} c(i; x, y)}, \right.$$

$$\left. n = N_1, \dots, N_2 \right\}.$$

В результаті отримуємо профіль перерізу зворотнього розсіювання вздовж шляху поширення зонduючого сигналу.

6. Обчислюємо дисперсію зворотньо-розсіяного сигналу (усередненого на проміжку $[N_1, N_2]$ значення інтенсивності):

$$D(x, y) = \sum_{n=N_1}^{N_2} \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} r(n; x, y). \quad (3)$$

У випадку багат шарового покриття усереднення (3) проводиться на проміжку, який відповідає стику шарів по товщині.

Далі проводиться сканування досліджуваної області покриття і обчислюється дисперсія $D(x, y)$ (п.п. 1–6) в кожній точці сканування. В місцях, де адгезія відсутня і є відшарування, дисперсія зростає.



Будується гістограма розподілу дисперсії $D(x, y)$ для контрольованого об'єкта для визначення, чи є на контрольованій поверхні місця з відшаруваннями. У випадку, коли адгезія покриття по контрольованій поверхні добра і немає відшарувань, спостерігається розподіл дисперсії $D(x, y)$, подібний до релеївського. Причому значення дисперсії обмежені величиною D_{\max} . Це реперне значення визначається, в першу чергу, різницею імпедансів покриття і підкладки (основи), а також рівнем структурних завод. При наявності відшарувань pojawiaються значення дисперсії, які в рази перевищують D_{\max} . На скільки дисперсія, яка відповідає відшаруванню, перевищує дисперсію від кондиції, залежить від співвідношення відповідних імпедансів, структурних завод тощо. Таким чином, на основі гістограми дисперсій по факту наявності значень дисперсій, які віддалені від розподілу дисперсій, подібного до релеївського, судять про наявність відшарувань.

У випадку, коли є еталонний зразок з покриттям без відшарувань, знаходимо граничне значення дисперсії D_0 , яке розділятиме область кондиції від області з відшаруванням. Для цього будемо гістограму розподілу дисперсій і знаходимо значення D_{\max} . За D_0 приймаємо $D_0 = D_{\max} + \Delta$, де Δ визначається структурними шумами і параметрами розподілу. Про наявність відшарування буде свідчити нерівність $D(x, y) > D_0$.

Будується поверхня залежності дисперсії від координат $D(x, y)$, яка відповідає поверхні сканування, для виявлення місць відшарування, обчислення їх площ і подальшого оцінювання адгезійної міцності. Місцям з пониженою адгезією (відшаруваннями) будуть відповідати підвищені рівні дисперсії. На основі побудованої поверхні $D(x, y)$ визначаємо місця відшарувань $A_1(x_1, y_1)$, $A_2(x_2, y_2)$, ... і обчислюємо їх площі $t_1(x_1, y_1)$, $t_2(x_2, y_2)$, ... У випадку, коли в розглядуваній області покриття S площа відшарувань складає T і її можна обчислити, як суму $t_1(x_1, y_1)$, коли (x_1, y_1) належать S , то адгезійна міцність для даної області покриття становитиме $C = C_0(S - T)/S$.

Будується поверхня залежності адгезійної міцності від координат, яка відповідає поверхні сканування, для досліджуваного об'єкта наступним чином. Спочатку проводимо розбиття поверхні сканування на елементарні ділянки. За поверхнею $D(x, y)$ знаходимо просторовий розподіл відшарувань для кожної елементарної ділянки розбиття. Обчислюємо площі цих відшарувань в кожній елементарній ділянці $T(x, y)$ як суму $t_1(x_1, y_1)$, коли (x_1, y_1) належать цій елементарній ділянці. Далі отримуємо просторовий розподіл адгезійної міцності $C(x, y) = C_0(S - T(x, y))/S$. Тут S – площа елементарної ділянки. Розміри елементарної ділянки вибираються, виходячи з необхідної роздільної

здатності для $C(x, y)$, кроку сканування, апіорних даних про розміри відшарувань і просторовий розподіл адгезійної міцності.

Експериментальні дослідження. Для перевірки правомірності використання зворотньо-розсіяного УЗ сигналу та алгоритму його обробки для визначення просторового розподілу адгезійної міцності виготовлені зразки зі сталі та алюмінію (50 мм×50 мм×8 мм) з електродуговим покриттям. Газотермічне покриття товщиною ~1,2 мм наносили на підготовлену поверхню (50 мм×50 мм) шляхом дробоструминної обробки. Причому на поверхні основи окремі ділянки (1 мм×1 мм) не обробляли. На необроблених ділянках адгезія покриття менша, ніж на поверхні, яка оброблена. Після напилення поверхню покриття обробляли механічно для підготовки до УЗ експериментів.

Проведені експерименти: сканування поверхні зразка з газотермічним покриттям прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем П112-10-6/2-Т-003 (частота 10 МГц) з кроком 5 мм, реєстрація та обробка зворотньо-розсіяного сигналу в області сканування, побудова гістограми дисперсії, визначення наявності відшарувань за гістограмою, побудова просторового розподілу дисперсії, який відображає розміщення відшарувань.

На рис. 5 приведені результати експериментальних досліджень для двох зразків зі сталі із покриттям (один зразок з відшаруваннями, інший – без відшарувань): гістограми дисперсій та просторовий розподіл дисперсій, який відображає розміщення відшарувань.

Експерименти засвідчили, що для зразка з газотермічним покриттям без відшарувань гістограма дисперсій інформативних частин зворотньо розсіяних сигналів подібна до релеївського розподілу і знаходиться в межах до 0,018 ум.од. (рис. 5, а). Як показують експерименти, для зразка з відшаруваннями переважна частина результатів вимірювань відноситься до таких, для яких дисперсія знаходиться в межах, як і для зразка без відшарувань. Однак, як видно з рис. 5, б, окремим вимірюванням характерні дисперсії в межах [0,2...0,3] ум.од., а також в околі 0,6 ум.од. Ці місця інтерпретуються як такі, що є відшарування. Знайшовши відношення площ відшарувань до площі сканування та провівши «тарування» до відомої адгезійної міцності покриття без відшарування, отримуємо адгезійну міцність покриття для досліджуваного зразка.

Аналогічні експериментальні дослідження проведені для зразків з алюмінію з газотермічним покриттям (рис. 6).

Для зразка з алюмінію з газотермічним покриттям без відшарувань дисперсія інформативних частин зворотньо-розсіяних сигналів знаходилась

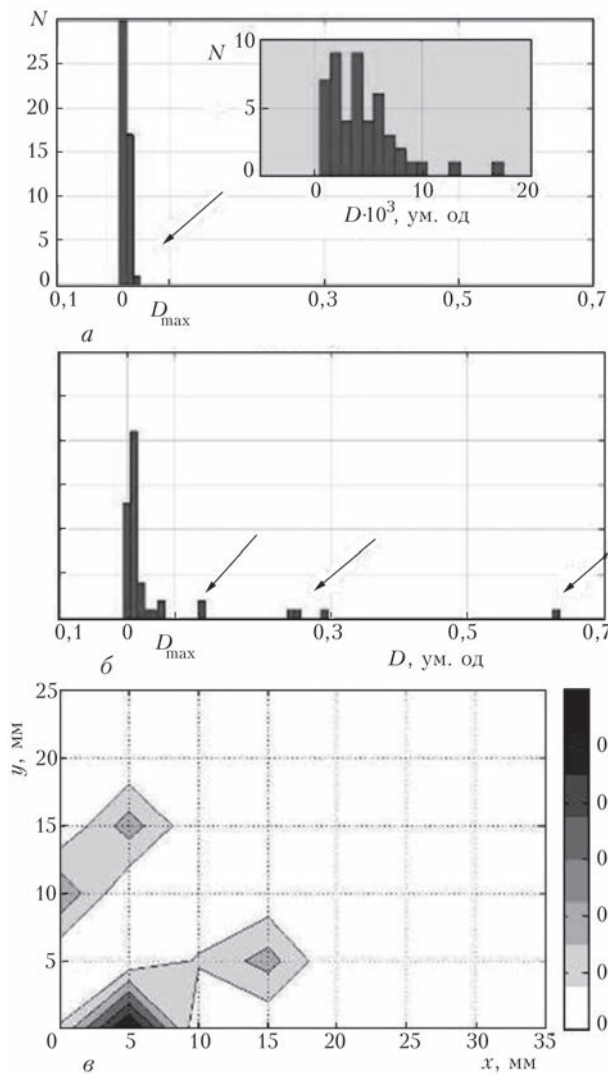


Рис. 5. Гістограма дисперсій (а, б), карта відшарувань (в) для зразків зі сталі з газотермічним покриттям (кількість вимірювань $N = 48$)

в межах до 0,24 ум.од. (рис. 6, а). Якщо порівняти зі сталлю, то таке зростання дисперсії може бути обумовлене різними імпедансами покриття зі сталі – підкладка зі сталі та покриття зі сталі – підкладка з алюмінію. Для алюмінієвого зразка з покриттям з відшаруваннями в окремих місцях дисперсія становила (0,6...0,8) ум.од., а також (1,2...1,3) ум. од. (рис. 6, б). За результатами експериментів побудована карта відшарувань (рис. 6, в).

Висновки

Розроблено неруйнівний УЗ метод картографування адгезійної міцності газотермічного покриття. Метод полягає в наступному: проводять сканування поверхні об'єкта з покриттям прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, ультразвукове зондування повздовжньою хвилею, реєстрацію та статистичну обробку зворотньо-розсіяного УЗ сигналу. За інформативний параметр про якість адгезії в «точці» реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу прийнято дисперсію сигналу.

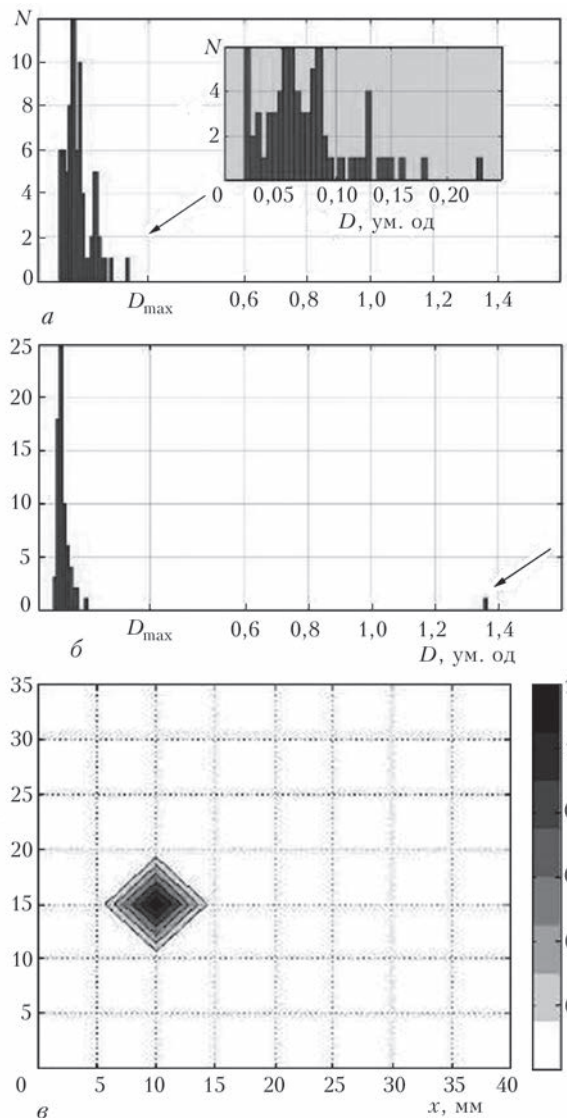


Рис. 6. Гістограма дисперсій (а, б), карта відшарувань (в) для зразків з алюмінію з газотермічним покриттям ($N = 72$)

Експериментально отримано, що при відсутності відшарувань покриття від основи гістограма дисперсій, обчислених в різних «точках» сканування, подібна до релеївського розподілу. Дисперсії не перевищують певного граничного значення. В місцях з відшаруванням дисперсія в рази перевищує це граничне значення. Будують карту просторового розподілу дисперсій поверхні сканування, яка відображає розміщення відшарувань. Цю карту тарують до адгезійної міцності. В результаті отримують карту адгезійної міцності покриття. Наведені результати експериментальної апробації на зразках з газотермічним покриттям.

- ГОСТ15140–78. Методы определения адгезии. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 13 с.
- Пат. RU 2084868 Способ определения адгезии газотермического покрытия / А.Б. Коберниченко, Е.Н. Моос. – Оpubл. 20.07.1997.
- Rokhlin S. I., Marom D. Study of adhesive bonds using low-frequency obliquely incident ultrasonic waves // J. Acoust. Soc. Am. – 1986. – 80 (2), August.
- <http://www.studfiles.ru/preview/1199877/page/2/>



5. *Goglio L., Rossetto M.* Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets // *NDT&E International*. – 1999. – 32. – P. 323–331.
6. *Неразрушающий контроль: В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / Под ред. В.В.Сухору-*

кова // И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов. – М.: Высш. шк., 1991. – 283с.

7. <http://www.williamspublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>

A non-destructive method of determination of adhesion strength of thermally-sprayed coating on the surface of a thick-walled item on the basis of recording the back-scattered US signal in the form of an A-scan was proposed. Physical principles of the method, ultrasonic technology for its realization and results of experimental verification for samples with thermally-sprayed coating are presented. 7 References, 6 Figures.

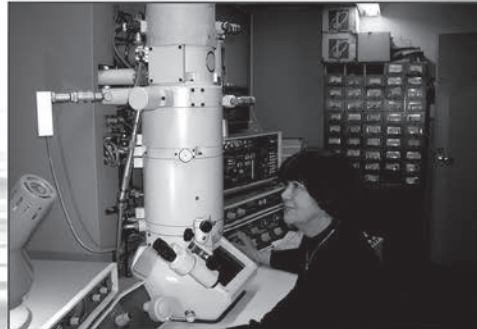
Keywords: adhesion; US back-scattered signal; statistical processing; histogram

*Надійшла до редакції
17.07.2015*

ЦЕНТР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Центр физико-химических исследований материалов Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ оснащен уникальным комплексом аналитического и исследовательского оборудования ведущих фирм Японии, США, Западной Европы и является единственным в Украине. В центре работают высококвалифицированные специалисты, многие из которых прошли стажировку в научно-исследовательских центрах ведущих европейских стран и США.

В центре занимаются аналитическими, материаловедческими, физико-химическими исследованиями пирометаллургических процессов, а также фундаментальными исследованиями физических и металлургических процессов сварки и родственных технологий, выяснением причин и механизмов разрушения конструкций и сварных соединений.



Просвечивающий электронный микроскоп JEM-200-CX (фирма «JEOL», Япония) позволяет получить представление о структурно-фазовом состоянии материала



ICP-спектрометр ICAP6500 DUO (фирма «Thermo Fisher Scientific», США) позволяет анализировать атомарный состав различных материалов



Оже-микросонд с полевым эмиссионным катодом JAMP-9500F (JEOL Ltd, Япония), укомплектованный энергодисперсионным спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350 для анализа элементов от бериллия до урана.



Автоматизированная динамическая система для моделирования (имитации) термомеханического состояния металлов GLEEBLE-3800 фирмы DSI (USA).



Анализаторы газов RO-316, RH-2 (фирма «LECO», США) предназначены для определения содержания кислорода, азота и водорода в металлах



ТЕПЛОВИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ НА МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ

В. М. СЛАВКОВ, О. П. ДАВИДЕНКО

Нац. техн. ун-т «ХПИ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21. E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Розглянуто спосіб теплового неруйнівного контролю металів, який може знайти застосування в енергетиці, машинобудуванні, чорній і кольоровій металургії при ідентифікації поверхневих та внутрішніх дефектів металургійних виробів, зокрема виробів, виготовлених методом безперервного лиття, та прокатних. Здійснено аналіз теплових полів металевих пластин з присутніми в них дефектами різного виду та теплових полів джерел нагріву. Дослідження проводили з використанням цифрового фотоапарату Canon EOS 20D з подальшою обробкою цифрових фотографій за допомогою програмних середовищ Photoshop та MathCAD та просторовою візуалізацією отриманих результатів. Об'єктами дослідження було обрано сталеві пластини (марка сталі 08X18H10) та газовий нагрівач TORCH WS-503C. В результаті проведення досліджень були отримані математичні моделі теплового випромінювання, яке формує газовий нагрівач TORCH WS-503C та тривимірний вигляд функції інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання сталеві пластини з дефектами, по характеру якої можливо провести їх ідентифікацію. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, газовий нагрівач, температурна лампа, абсолютно чорне тіло, дефект, металева пластина, теплове випромінювання

У теплових методах неруйнівного контролю в якості пробної використовується тепла енергія, що поширюється в об'єкті контролю. Температурне поле поверхні об'єкта є джерелом інформації про особливості процесу теплопередачі, які, в свою чергу, залежать від наявності внутрішніх або зовнішніх дефектів, умов теплообміну з навколишнім середовищем, геометричних і теплофізичних характеристик об'єкта. У багатьох галузях науки, які інтенсивно розвиваються, прогрес залежить від вирішення проблеми вимірювання локальних густин теплових потоків на поверхнях об'єктів дослідження, контролю або управління. Зокрема, це теплоенергетика, теплові двигуни, металургія, електроніка, ракети і космічні апарати, медицина, біологія, тепловимірювальні прилади різного призначення: приймачі теплового випромінювання, вимірювачі теплових витрат промислових і житлових об'єктів, теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалів [1].

При здійсненні теплового НК та способу формування теплових полів на металевих пластинах (МП) в якості первинного перетворювача (ПП) використовується цифровий фотоапарат (ЦФ), попереднє калібрування якого здійснюється за допомогою еталона абсолютно чорного тіла (АЧТ) [2]. Проте, окрім безпосереднього вимірювання температури досліджуваного металу, була розглянута можливість встановлення присутніх в металі дефектів, що, в свою чергу, дозволило дослідити параметри теплового випромінювання одного

газового нагрівача (ГН) та здійснити просторове моделювання теплового випромінювання від n -ї кількості таких нагрівачів.

Мета роботи – подальший розвиток методу дистанційного контролю теплових полів об'єктів за допомогою ЦФ, вивчення похибок і невизначеності на основі аналізу отриманих експериментальних даних.

Теоретичні й експериментальні дослідження. Наявність дефектів призводить до локального або інтегрального викривлення теплового поля, характерного для даного металу. Це виражається у появі перепадів температури. Просторово-часова функція цих перепадів визначається температурою металу, умовами його теплообміну з навколишнім середовищем, геометричними і теплофізичними характеристиками металу і самих дефектів, а також часом у динамічному режимі [3]. Модель активного теплового контролю з використанням ЦФ, яка застосовувалась при дослідженнях, представлена на рис. 1. Дана модель передбачає наявність джерела енергії, в якості якого використовувався ГН TORCH WS-503C. Дефект, який присутній в металі, робить значний опір тепловому потоку, який, поширюючись вглиб металу, обтікає дефект оточуючими шарами металу. При цьому має місце накопичення тепла в шарі до дефекту і його недолік в шарі за ним, що проявляється в локальному підвищенні температури поверхні H , яка нагрівається, і зниженні на протилежній нагріванню поверхні L . Іноді кажуть, що дефект

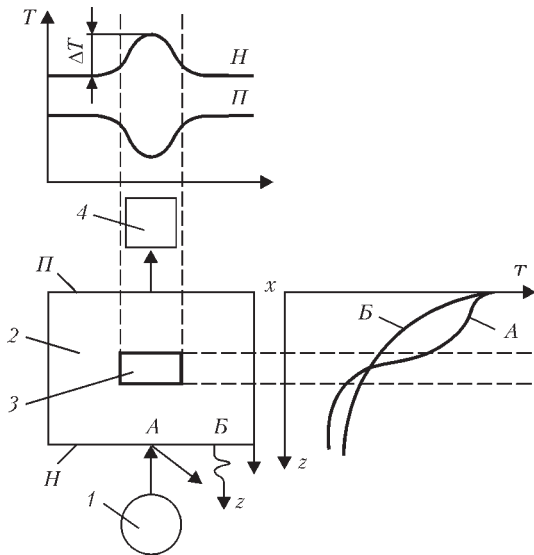


Рис. 1. Модель активного теплового контролю з використанням ЦФ: 1 – джерело енергії; 2 – досліджуваний метал; 3 – дефект; 4 – ЦФ; А – точка локального нагріву; Б – випромінююча точка поверхні металу, що нагрівається; x – напрямок сканування джерела енергії з локальним впливом; z – напрямок вплиб металу; T – температура відображає тепловий потік на поверхню H і затінює його на поверхні П.

Використання ЦФ у якості ПП можливо завдяки приладу із зарядовим зв'язком – ПЗЗ-матриці, яка входить до його складу. ПЗЗ-матриця накопичує заряд, пропорційний часу її експонування тепловим випромінюванням, що йде від теплового поля, утвореного ГН. Кожен субпіксель ПЗЗ-матриці являє собою осередок, над яким знаходиться світлофільтр, внаслідок чого даний осередок накопичує заряд для певного компонента кольору (червоного, зеленого або синього) світлового потоку (рис. 2, а). Потім даний накопичений заряд

оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) ЦФ (кількість ступенів квантування $N = 2^8 = 255$) [4]. Перехід до яскравішої температури металу T_b можливо здійснити, використовуючи функцію її взаємозв'язку з відносним значенням рівня червоного каналу R зображення $T_b = f(R)$, яка встановлюється при проведенні процедури калібрування ЦФ схематично представленої на рис. 2, б.

Експериментальні дослідження з використанням ЦФ Canon EOS 20D, основні технічні характеристики якого наведено в табл. 1 [5], було проведено на кафедрі ІВТС НТУ «ХП» в спеціалізованій лабораторії. На об'єктив ЦФ (HELIOS 44M-4) попередньо було встановлено інтерференційний фільтр, для виділення довжини хвилі $\lambda = 610$ нм, потім ЦФ закріплювався на штативі для запобігання вібрацій і підключався до персонального комп'ютера (ПК).

При проведенні експерименту використовувався ГН TORCH WS-503С, технічні характеристики якого також наведено в табл. 1 [6]. ГН було розташовано вертикально до поверхні нагріву, у якості якої використовувався лист нержавіючої сталі марки 08X18Н10 розмірами 100×100 мм товщиною 1,5 мм. Відстань від ЦФ до поверхні фотографування становила 0,5 м (рис. 3, а). МП з присутніми дефектами (рис. 3, б) (точковий – 1...2 мм, рис. 3, область 1; раковина 8...10 мм, область 2; канавка 1...1,2 мм, довжина 50 мм, область 3) піддавалася нагріву до температури видимого діапазону спектра, після чого проводилось її фотографування і передача отриманих цифрових фотографій по дротяній або бездротяній лінії зв'язку на ПК, на якому відбувалися необ-

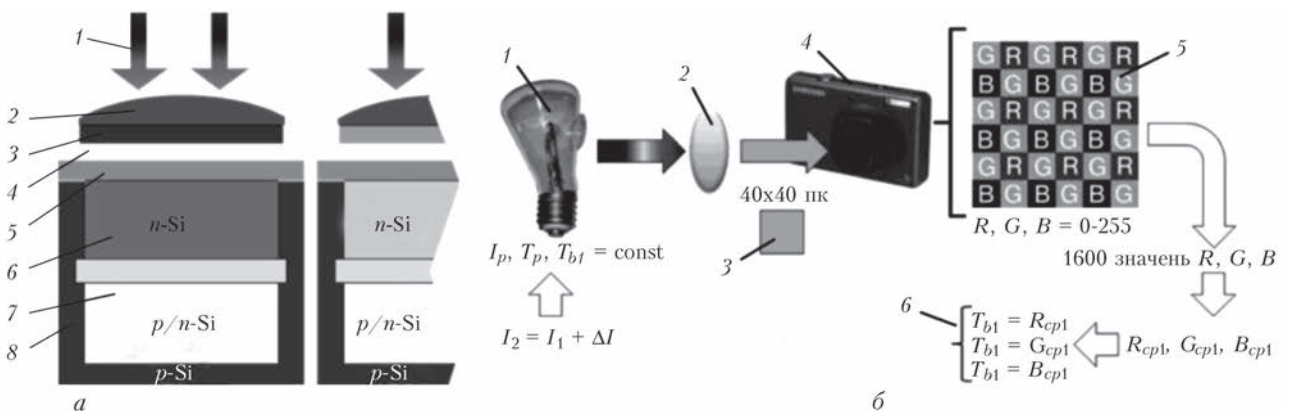


Рис. 2. Структурна схема складу субпікселя ПЗЗ-матриці ЦФ (а) та процедура його калібрування (б): для а – 1 – фотони світла; 2 – мікролінза субпікселя; 3 – R – червоний світлофільтр субпікселя, фрагмент фільтра Байєра; 4 – прозорий електрод з полікристалічного кремнію або сплаву індію та оксиду олова; 5 – оксид кремнію; б – кремнієвий канал n-типу: зона генерації носіїв – зона внутрішнього фото ефекту; 7 – зона потенційної ями, де збираються електрони із зони генерації носіїв заряду; 8 – кремнієва підкладка p-типу; для б – 1 – електрична температурна лампа ТРВ 1100-2350; 2 – вузькосмуговий інтерференційний фільтр на довжину хвилі 610 нм; 3 – область зображення вольфрамової стрічки розмірами 40×40 пікселів; 4 – цифровий фотоапарат Canon EOS 20D; 5 – ПЗЗ (CCD) матриця цифрового фотоапарату Canon EOS 20D; б – матриці рівнянь $T_b = R_{cp1}$, по яким встановлено функцію взаємозв'язку $T_b = f(R)$, тобто $T_b = (R + 881,68)/1,1981$ (для $\Delta t = 1/8$ с), $T_b = (R + 835,14)/0,9075$ (для $\Delta t = 1/200$ с), $T_b = (R + 678,88)/0,588$ (для $\Delta t = 1/6400$ с)



Таблиця 1. Технічні характеристики ЦФ Canon EOS 20D та нагрівача TORCH WS-503C

ЦФ Canon EOS 20D		TORCH WS-503C	
Пікселі	Ефективна кількість 8,2 Мпк	Паливо	Газ бутан
Розмір файлу	Формат RAW – прибіл. 8,7 Мб (3504×2336пк)	Діаметр горілки	39 мм
Кольорова палітра	sRGB, AdobeRGB	Номінальна теплова потужність	1,65 кВт
Коригування колірної температури	±9 ступенів з кроком в повну ступень	Споживання газу	80 г/год
Чутливість ISO	100 ... 3200	Максимальна температура нагріву	1300 °С
Витримки затвору	1/8000 с – 30 с	Висота сфокусованого полум'я	10 мм ... 50мм

хідні дії з обробки та систематизації даних. За допомогою програмного забезпечення комп'ютерного моделювання встановлювався візуальний тривимірний вигляд функції інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання МП, по характеру якої можливо ідентифікувати внутрішні та зовнішні дефекти металу. На рис. 3, б, в представлені зображення МП з присутніми дефектами та тривимірна функція інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання МП відповідно.

Експериментальні дослідження теплового випромінювання ГН проводили дистанційно за допомогою програми EOS Utility [5], яка входить до складу програмного забезпечення ЦФ, обсяг серійної зйомки становив 20 кадрів, інтервал часу зйомки $t_{зйомки} = 5$ с. На ЦФ встановлювались наступні параметри зйомки: витримка 0,6 с; діафрагма F2,0; чутливість ISO – 100; баланс білого (колірна температура) 6500 К; формат файлу зображення RAW; режим виміру експозиції – TTL вимір при повністю відкритій діафрагмі за допомогою 35-зонного кремнієвого фотоелемента. В результаті було отримано 20 зображень теплового випромінювання МП (200×200 пікселів,

37 піксель/дюйм), яке формує ГН, в процесі нагрівання листа нержавіючої сталі марки 08X18H10, розмірами 500×500 мм, товщиною 1,5 мм (рис. 4).

Подальша обробка цих зображень за допомогою вбудованої функції *READ_RED* (файл зображення) програмного середовища MathCAD [7] дозволила отримати просторову (двомірну) $x, y = M[R]$ та одномірну $x = M[R]$ матриці реальних значень рівня червоного каналу – R файлів зображень, де x, y – просторові координати, вказані у пікселях (пк) (рис. 5). Для переведення значень x, y (вказаних у пікселях) в метри, необхідно помножити їх на перевідний коефіцієнт $K = 0,0254/B$, де B – роздільна здатність зображення, піксель/дюйм.

Встановлено, що графічне зображення просторового (рис. 5, а) та одномірного (рис. 5, б) розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображення відображає двомірну (1) та одномірну (2) функцію щільності ймовірності нормального закону розподілення, тому далі була проаналізована можливість отримання просторової та одномірної моделей теплового випромінювання ГН за допомогою цієї функції:

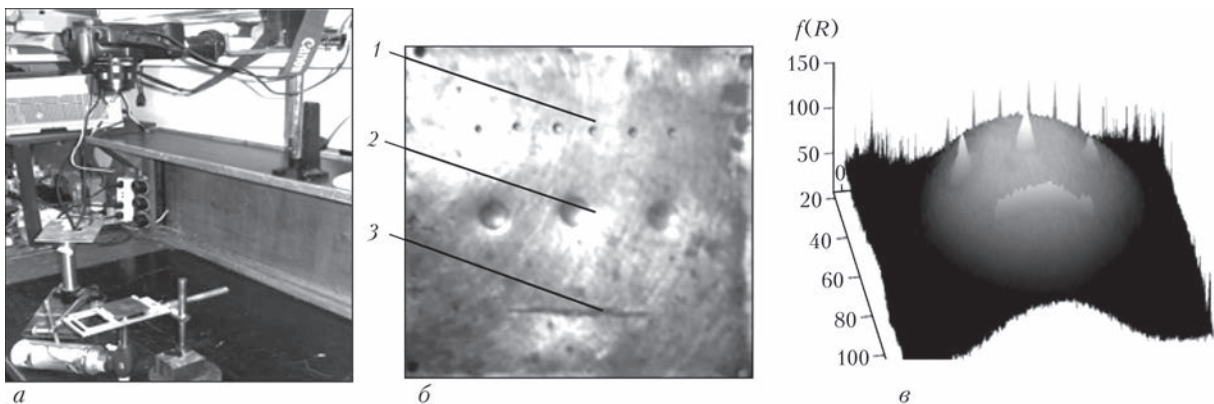


Рис. 3. Встановлення дефектів пластини із нержавіючої сталі марки 08X18H10 (позначення а–в див. у тексті)

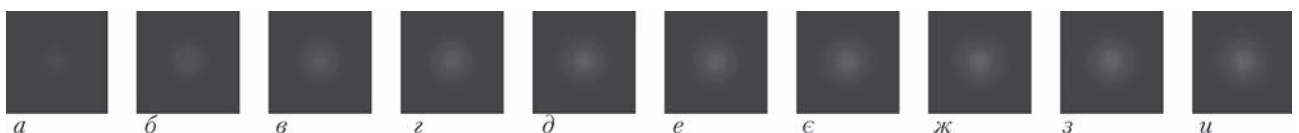


Рис. 4. Зображення теплового випромінювання, сформоване ГН у різні моменти часу нагрівання t_n : а – $t_n = 10$ с; б – 20; в – 30; г – 40; д – 50; е – 60; є – 70; ж – 80; з – 90; и – 100

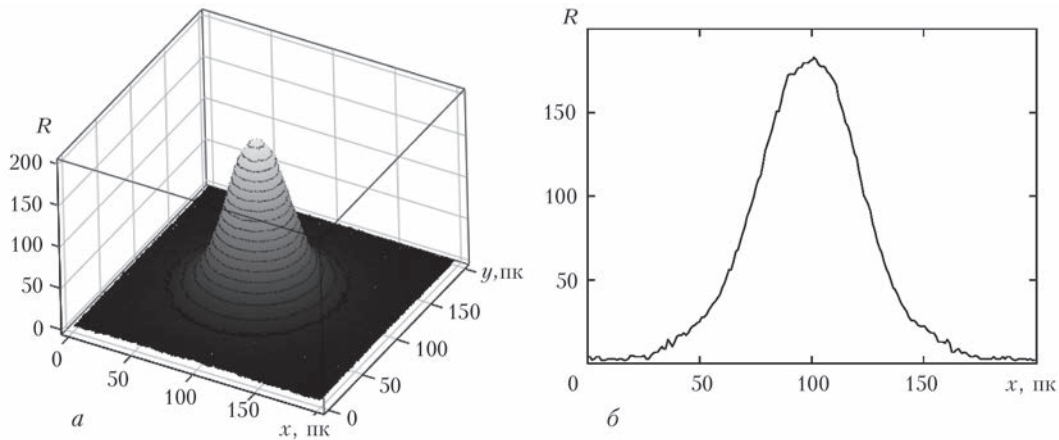


Рис. 5. Графічне зображення просторового (а) та одновимірного (б) розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображення теплового випромінювання ГН в момент часу $t = 100$ с

$$f(x, y) = k \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma^2}\right) \right] \times \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_2)^2}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (1)$$

$$f(x) = k \left[\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \right]. \quad (2)$$

де μ, μ_1, μ_2 – математичне очікування, характеризує місце розташування нормального закону на поверхні, пк; σ – дисперсія розподілення, пк; k – масштабний коефіцієнт.

Реалізація методу найменших квадратів [8] дозволила встановити параметри функції щільності ймовірності нормального закону розподілення ($\mu, \mu_1, \mu_2, \sigma, k$) при виконанні умови найкращої апроксимації розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображення. Моделі було отримано за допомогою використання вбудованої функції щільності ймовірності нормального закону розподілення – `dnorm(x, mu, sigma)` програмного середовища MathCAD для випадку $t = 100$ с [7].

Остаточний вигляд функцій $f(x, y)$ та $f(x)$, які записані згідно синтаксису програмного середовища MathCAD та їх графічного зображення представлено на рис. 6.

На основі проведених досліджень було розроблено алгоритм у програмному середовищі MathCAD, який дозволяє моделювати теплові випромінювання від n -ї кількості ідентичних за параметрами ГН в динамічному режимі нагрівання, при попередньому аналізі теплового випромінювання від одного ГН за допомогою методики, яка описана вище. Алгоритм включає функції зчитування файлів зображення; функції обробки та візуального відображення отриманих теплових випромінювань; функції пошуку параметрів нормального закону розподілення по методу найменших квадратів; функції графічного відображення отриманої математичної моделі від n -ї кількості ГН; функції аналізу та розрахунку похибок апроксимації реальних теплових випромінювань нагрівачів їх моделями. Використання програми EOS Utility [5] дозволило автоматизувати процес фотографування динамічного теплового випромінювання ГН та прискорити процес аналізу отриманих даних. Розроблений алгоритм частково на-

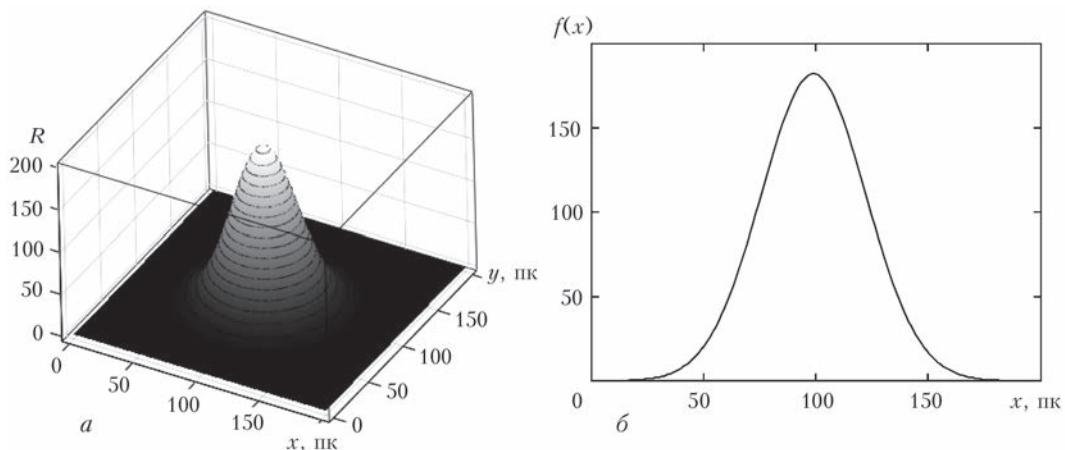


Рис. 6. Графічне зображення просторової (а) та одновимірної (б) математичних моделей функції щільності ймовірності нормального закону розподілення в момент часу $t = 100$ с ($k = 1,066 \cdot 10^4$; $\mu = 98,781$ пк; $\sigma = 23,332$ пк): а – $f(x, y) = k \cdot \text{dnorm}(x, \mu, \sigma) \cdot \text{dnorm}(y, \mu, \sigma)$; б – $f(x) = k \cdot \text{dnorm}(x, \mu, \sigma)$

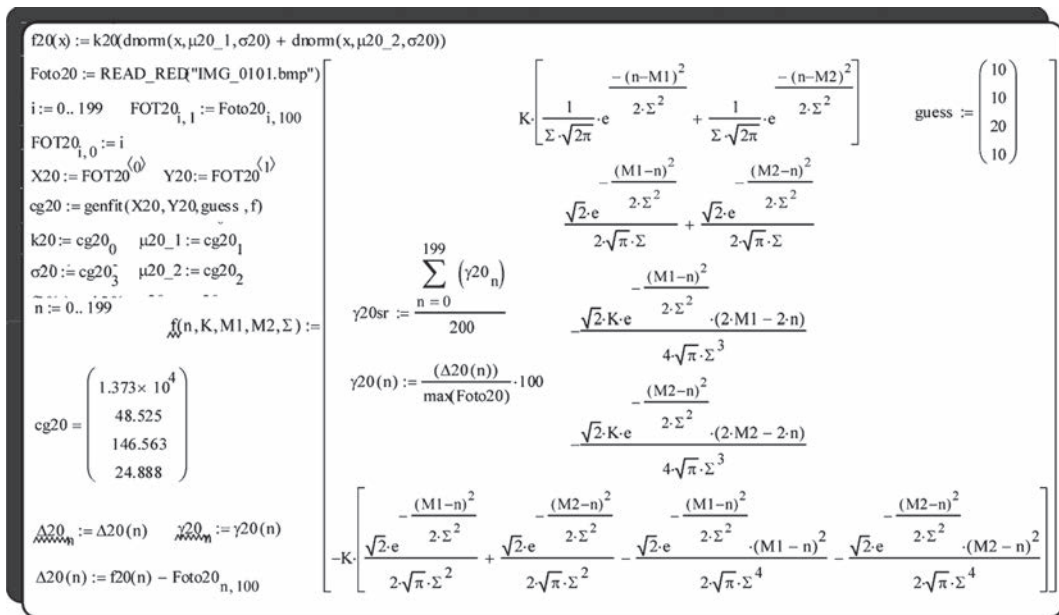


Рис. 7. Скорочене представлення алгоритму просторового моделювання теплових випромінювань ГН

ведено на рис. 7, тому що він включає фрагменти, які повторюються в залежності від кількості файлів зображень теплового випромінювання нагрівача.

В результаті обробки зображень теплового випромінювання від двох ГН було отримано графічне зображення просторового розподілення в момент часу $t_{10} = 100$ с (рис. 8, а) та сімейство кривих одномірного розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R в моменти часу $t_1 = 10$ с, $t_2 = 20$ с, ..., $t_{10} = 100$ с, $\Delta t = 10$ с (рис. 8, б).

В результаті моделювання теплового випромінювання від двох газових нагрівачів за допомогою розробленого алгоритму було отримано графічне зображення просторової в момент часу $t_{10} = 100$ с (рис. 9, а) та сімейство кривих одномірної в моменти часу $t_1 = 10$ с, $t_2 = 20$ с, ..., $t_{10} = 100$ с, $\Delta t = 10$ с (рис. 9, б) математичних моделей.

Значення масштабного коефіцієнта k та дисперсії σ для одномірної математичної моделі теплового випромінювання від двох ГН в кожний момент часу t представлені у табл. 2. Як вже було

зазначено, математичне очікування μ характеризує місце розташування ГН під поверхнею нагріву, тому це значення майже не змінюється та в табл. 2 не вказано. Окрім цього, за допомогою розробленого алгоритму було обчислене значення приведеної похибки апроксимації $\gamma_{\text{апр}}$ реального теплового випромінювання від двох нагрівачів їх моделями для кожного моменту часу t , яке також наведено в табл. 2.

Розроблений алгоритм просторового моделювання теплових випромінювань джерел нагріву є універсальним і дає змогу моделювати складні теплові поля від n -ї кількості джерел нагріву. На рис. 10 представлені теплові поля від чотирьох (а) та восьми (б) однакових джерел нагріву, розташованих за наступними схемами (рис. 10, б, з).

За отриманими даними (див. табл. 2) було встановлено характер зміни масштабного коефіцієнта k (рис. 11, а) та дисперсії σ (рис. 11, б) для випадку із двома нагрівачами. Слід зазначити, що існує також можливість встановити теплофізичні параме-

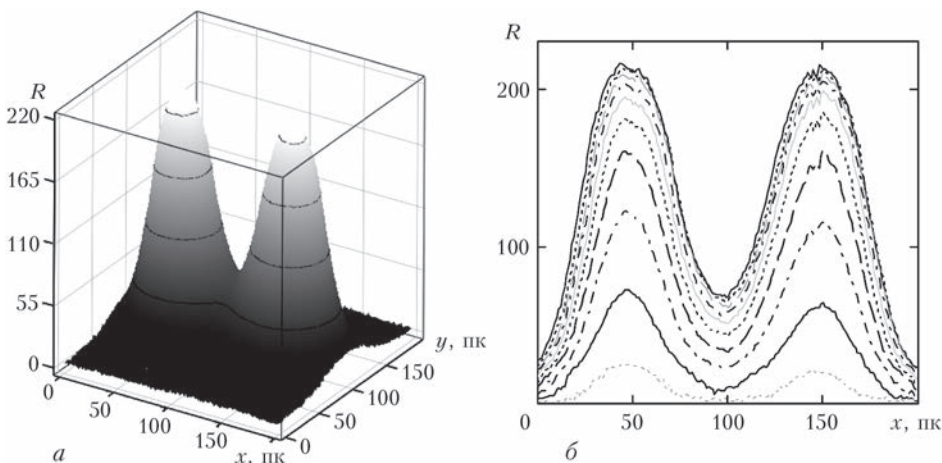


Рис. 8. Графічне зображення просторового ($t_{10} = 100$ с) (а) та одномірного ($t_1 = 10$ с, $t_2 = 20$ с, ..., $t_{10} = 100$ с, $\Delta t = 10$ с) (б) розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображень теплового випромінювання від двох ГН



Т а б л и ц я 2. Значення масштабного коефіцієнта k , дисперсії σ , приведеної похибки апроксимації $\gamma_{\text{апр}}$

Параметри розподілення	Моменти часу нагрівання $t_n, \text{с}$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Масштабний коефіцієнт $k \cdot 10^4$	0,091	0,313	0,586	0,824	1,003	1,132	1,218	1,284	1,332	1,373
Дисперсія σ , пк	16,066	19,425	20,420	21,289	22,195	22,959	23,608	24,127	24,544	24,888
Похибка апроксимації $\gamma_{\text{апр}}, \%$	-1,326	-0,261	-0,260	-0,148	0,024	0,120	0,174	0,203	0,227	0,220

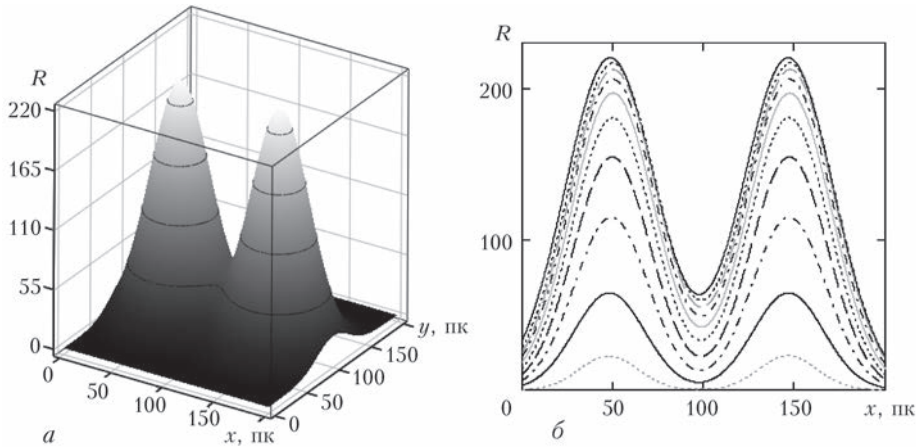


Рис. 9. Графічне зображення просторової ($t_{10} = 100 \text{ с}$) (а) та одновірної ($t_1 = 10 \text{ с}, t_2 = 20 \text{ с}, \dots, t_{10} = 100 \text{ с}, \Delta t = 10 \text{ с}$) (б) математичних моделей теплового поля від двох ГН

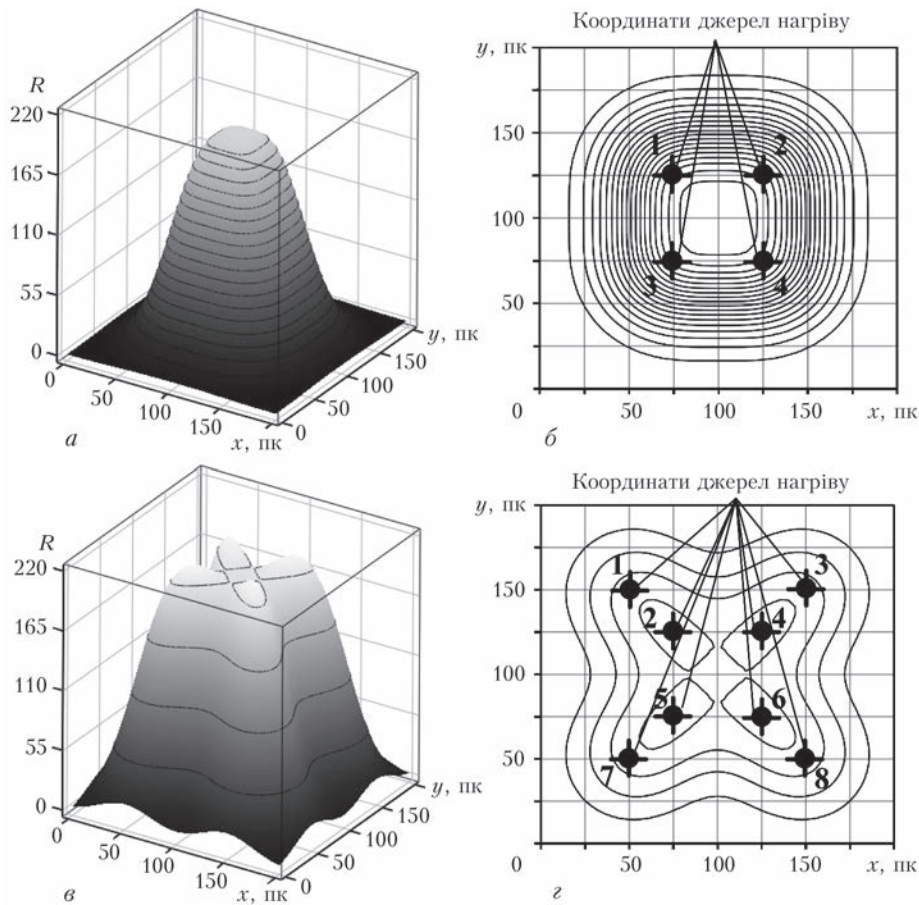


Рис. 10. Графічне зображення просторових моделей теплових полів від n -ї кількості однакових джерел нагріву: а, в – модель теплового поля від чотирьох (а) та восьми (в) джерел нагріву; б, г – схема розташування відносно для чотирьох (б) та восьми (г) джерел нагріву

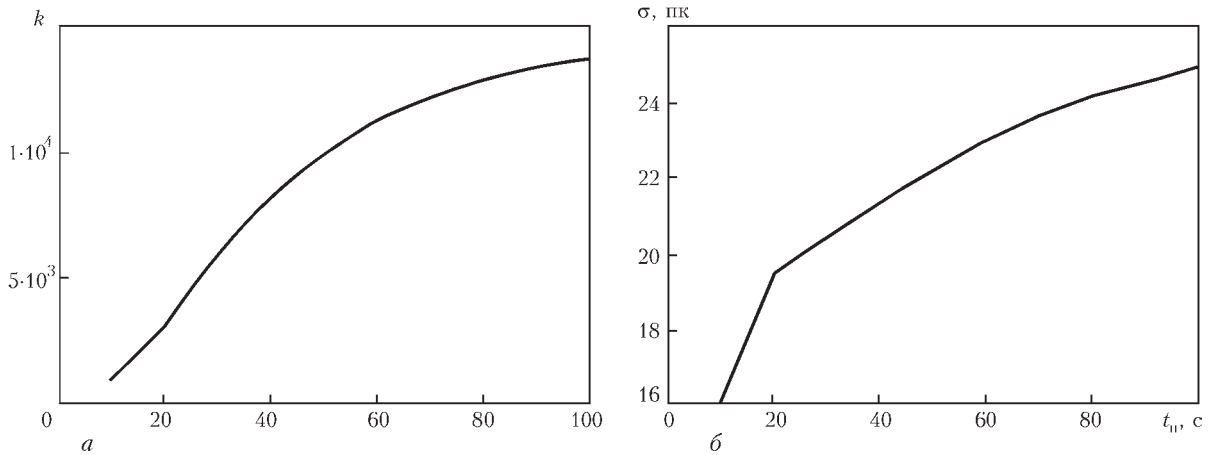


Рис. 11. Графіки функцій залежності масштабного коефіцієнта $k = f(t_n)$ (а) та дисперсії $\sigma = f(t_n)$ (б) при динамічному нагріванні нержавіючої сталі марки 08X18N10

три матеріалу, нагрів якого здійснюється за допомогою ГН по функціям залежності масштабного коефіцієнта k і дисперсії σ від часу нагрівання t_n .

Висновки

Встановлено, що за характером функції інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання МП можливо ідентифікувати внутрішні та зовнішні дефекти металу. Отримані при обробці зображень теплових випромінювань джерел нагріву експериментальні дані підтверджують розроблені за допомогою алгоритму програмного середовища MathCAD математичні моделі цих випромінювань, а також дають змогу припустити, що цей алгоритм моделювання можливо застосовувати при визначенні теплофізичних параметрів матеріалу, що піддається нагріванню. Подальші дослідження слід спрямувати на встановлення залежності параметрів функції щільності ймовірності нормального закону розподілення від теплофізичних властивостей мате-

ріалу при динамічному режимі нагрівання (охолодження).

1. Пилипенко Н. В. Методы и приборы нестационарной теплотометрии на основе решения обратных задач теплопроводности. – С.-Пб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 180 с.
2. Вимірювання яскравісної та радіаційної температури об'єктів за допомогою цифрового фотоапарата / О. П. Давиденко, В. М. Славков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX Міжн. наук.-практ. конф., Ч. II (15–17 травня 2012 р., Харків). – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 105.
3. Неразрушающий контроль: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
4. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. Canon EOS 20D. Инструкция по эксплуатации. – CANON INC. 2004. – 168 с.
6. Mirco multi purpose butane gas torch WS-503C. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.hisupplier.com/product-826813-Mirco-multi-purpose-butane-gas-torch-WS-503C>.
7. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисления в MathCAD12. – С.-Пб.: Питер, 2006. – 544 с.
8. Гайдьшев И. Анализ и обработка данных. – С.-Пб.: Питер, 2001. – 750 с.

The paper deals with the method of thermal non-destructive testing of metals, which can be applied in power engineering, mechanical engineering, ferrous and non-ferrous metallurgy at identification of surface and internal defects of metallurgical products, in particular items made by continuous casting and rolling. Analysis of thermal fields of metal plates, incorporating defects of various kinds and thermal fields of heat sources, was made. Investigations were performed with application of digital camera Canon EOS 20D with further processing of digital photos using Photoshop and MathCAD software environments and spatial visualization of derived results. Steel plates (08Kh18N10 steel grade) and TORCH WS-503C gas heater were selected for investigations. Investigations allowed derivation of mathematical models of heat radiation generated by TORCH WS-503C gas heater and 3d view of intensity function of red channel $f(R)$ of the image of thermal radiation of a steel plate with defects, the shape of which allows them to be identified. 8 References, 2 Tables, 11 Figures.

Keywords: thermal nondestructive testing, digital camera, gas heater, temperature lamp, absolutely black body, defect, metal plate, thermal radiation

Надійшла до редакції
20.01.2015



ВЛИЯНИЕ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СИГНАЛЫ ДЕТЕКТОРОВ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В. Д. РЫЖИКОВ, А. Д. ОПОЛОНИН

Ин-т скантационных материалов НАН Украины. 61001. Харьков-1, пр-т Ленина, 60. E-mail: info@isma.kharkov.ua

Приведены результаты измерений вклада рассеянного излучения в сигналы линейки детекторов типа скантационатор-фотодиод, используемой в цифровой радиографической системе сканирующего типа. Для анодных напряжений рентгеновской трубки 50, 100 и 150 кВ при различных условиях фильтрации получены радиографические изображения стального ступенчатого клина. Оценен вклад рассеянного излучения в сигналы линейки детекторов типа скантационатор-фотодиод при просвечивании стального ступенчатого клина толщиной от 1 до 16 мм. Библиогр. 7, рис. 6.

Ключевые слова: цифровая радиография, рентгеновское излучение, рассеянное излучение, дефектор, скантационатор, фотодиод

Известно, что рассеянное излучение негативно влияет на качество изображения как в пленочной, так и в цифровой радиографии [1, 2]. Кроме того, предыдущие исследования авторов в области двухэнергетической радиографии свидетельствуют о том, что влияние рассеянного излучения приводит к существенной погрешности определения эффективного атомного номера Z_{eff} при ослаблении объектом контроля (ОК) рентгеновского излучения более чем на 90 % [3–7].

В работе описаны условия проведения эксперимента (спектр рентгеновского излучателя, параметры коллиматоров, фильтров и др.) и проанализированы результаты влияния рассеянного излучения на сигналы линейки детекторов типа скантационатор-фотодиод (СЦ-ФД) при сканировании стального ступенчатого клина.

Условия проведения эксперимента. Эксперимент проводили на базе прототипа трехэнергетической цифровой радиографической системы (ЦРС), в состав которой входит рентгеновский излучатель Isovolt Titan 160 и три 128-канальные линейки детектора (ЛД) с шагом детекторов 1,6 мм (рис. 1).

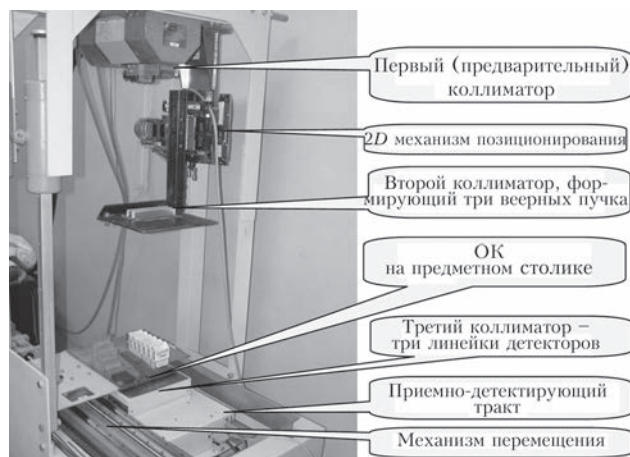


Рис. 1. Общий вид трехэнергетической ЦРС

© В. Д. Рыжиков, А. Д. Ополонин, 2015

Важным моментом в работе ЦРС является юстировка механических составляющих ЦРС. Так, уменьшение области облучения ОК снижает уровень рассеянного излучения, которое влияет на точность определения Z_{eff} .

Для юстировки системы коллиматоров использован оригинальный метод контроля излучения, падающего на третий коллиматор, расположенный непосредственно у ЛД. Суть метода следующая.

С помощью фотоаппарата, имеющего дистанционное управление с ПК (USB канал связи), получаем оптическое изображение коллиматора. С помощью флуоресцентного экрана получаем фотографию зоны облучения ЛД при том же положении фотоаппарата.

Используя графический редактор, изображения совмещаются, одно изображение делается полупрозрачным. В результате наглядно можно видеть как форму зоны облучения, так и расположение зоны облучения относительно коллиматора (рис. 2). Ширина щели третьего коллиматора 2 мм. Ширина поля облучения около 3,5...4,0 мм. Таким образом, во время сканирования облучается довольно малая площадь ОК. Для снижения вклада низкоэнергетического рассеянного ОК излучения между третьим коллиматором и ОК использовался допол-



Рис. 2. Совмещенное изображение третьего коллиматора и флуоресцентного экрана

нительный алюминиевый фильтр – пластинки толщиной 2 мм.

Эксперимент. Для получения радиографических изображений стального ступенчатого клина толщиной от 1 до 16 мм использовали три режима работы рентгеновской трубки. При анодном напряжении 50, 100 и 150 кВ применяли алюминиевые фильтры, толщиной пластинок 2 мм и медные, толщиной пластинок 2 и 5 мм. Ток трубки выбирали таким образом, чтобы уровень сигнала от ЛД во всех трех случаях был примерно одинаковый. Были измерены соответствующие спектры рентгеновского излучения, падающего на ОК (рис. 3).

Из рис. 3 можно видеть, что энергетические диапазоны излучения, используемого для получения теневых рентгеновских изображений, достаточно хорошо разделены.

Для оценки влияния рассеянного излучения на краю предметного столика механизма перемещения (МП) был расположен стальной ступенчатый клин толщиной от 1 до 15 мм. Получено ра-

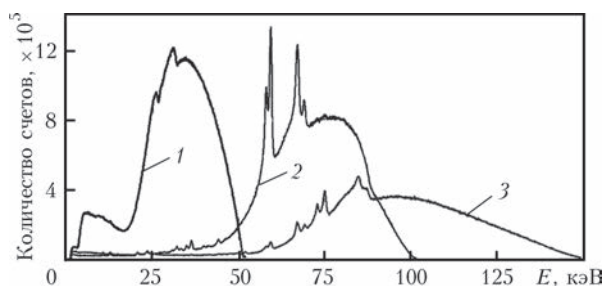


Рис. 3. Спектры рентгеновского излучения при различных анодных напряжениях с использованием фильтров из алюминия и меди различной толщины: 1 – 50 кВ, фильтр 4 мм Al; 2 – 100 кВ, фильтр 2 мм Cu; 3 – 150 кВ, фильтр 5 мм Cu

диографическое изображение клина при анодном напряжении 150, 100 и 50 кВ. На рис. 4 приведены полученные радиографические изображения стального клина при анодном напряжении 150 и 50 кВ (рис. 4, а, в) и уровни сигналов ЛД, соответствующих горизонтальным сечениям изображения клина в графическом виде (рис. 4, б, г).

Как можно видеть из рис. 4, а, б уровень сигнала детекторов соответствует самой толстой части клина и составляет около 2000 ед. в кодах АЦП (при уровне «темновой» калибровки 250), что соответствует примерно 97 %-му уровню ослабления выходного сигнала. Все степени клина четко разделяются, а влияние рассеянного излучения не вносит существенных искажений в радиографическое изображение.

Из рис. 4, в, г видно, что уровень сигнала детекторов при толщине клина 3 мм стали составляет 250 ед. (что соответствует уровню «темновой» калибровки). Дальнейшее увеличение толщины клина за счет рассеянного излучения приводит к увеличению сигнала детекторов почти до 300 ед. Таким образом, можно оценить вклад рассеянного излучения как 50 ед. в кодах 16-разрядного АЦП.

Для сравнения влияния рассеянного излучения при различных анодных напряжениях на одном графике построили зависимость уровней сигналов ЛД от толщины стального клина (1...15 мм) при анодном напряжении 150, 100 и 50 кВ (рис. 5).

Видно, что при анодном напряжении 150 кВ и применении фильтров (5 мм меди и 2 мм алюминия) зависимость уровня сигнала от толщины стали хорошо соответствует экспоненциальному закону ослабления. Отклонение от экспонен-

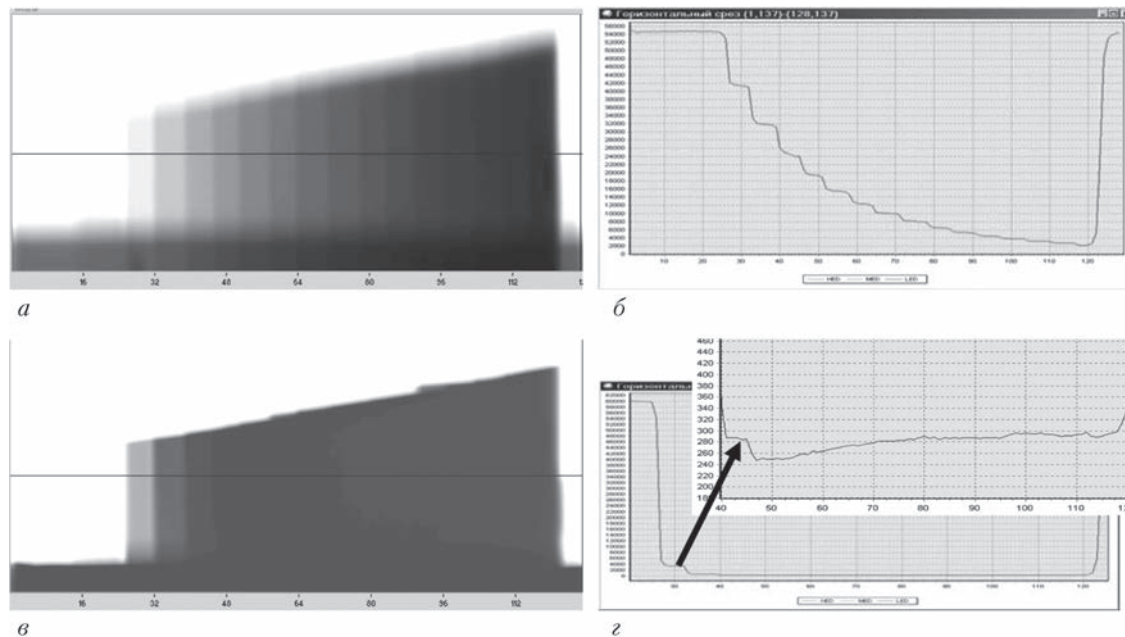


Рис. 4. Радиографическое изображение стального клина (1...15 мм) при анодном напряжении 150 (а) и 50 кВ (в), а также уровни сигналов в графическом виде (б, г) для горизонтального сечения изображения

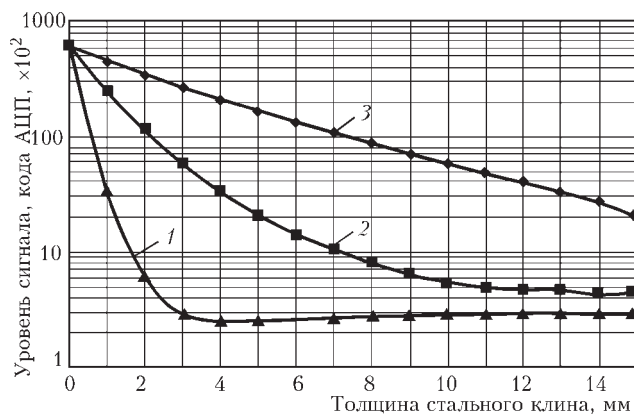


Рис. 5. Уровни сигналов ЛД, соответствующие горизонтальному сечению радиографического изображения стального клина при анодных напряжениях: 50 (1), 100 (2), 150 (3) кВ

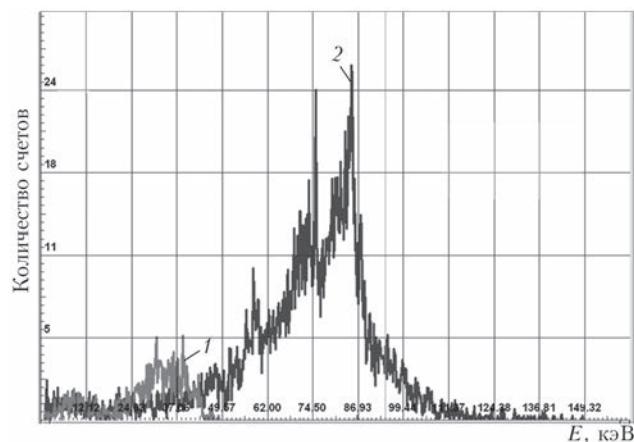


Рис. 6. Спектры рассеянного излучения на расстоянии 0,5 м от объекта контроля при получении радиографических изображений биологических объектов при анодных напряжениях 50 (1) и 150 кВ (2)

циального закона ослабления для анодного напряжения 100 и 50 кВ можно объяснить двумя факторами.

Во-первых, спектр излучения рентгеновского излучателя не монохроматический (рис. 3) и при уменьшении энергии излучения зависимость $\mu_m(E)$ для всех элементов таблицы Д.И. Менделеева имеет существенно большую производную.

Во-вторых, на фоне более резкого спада сигнала ЛД при снижении анодного напряжения возрастает влияние рассеянного излучения. Так, при анодном напряжении 150 кВ уровень сигнала отраженного от стали, толщиной более 15 м, составляет около 3 % начального уровня, при анодном напряжении 100 кВ – около 0,33 %.

The paper gives the results of measurement of the contribution of scattered radiation to the signals of an array of scintillator-LED type detectors, used in digital radiographic system of scanning type. Radiographs of steel step wedge were obtained for X-ray tube anode voltages of 50, 100 and 150 kV under different filtering conditions. Contribution of scattered radiation to signals of an array of detectors of scintillator-LED type was evaluated at scanning of steel step wedge of 1 to 16 mm thickness.

Keywords: digital radiography; X-Ray radiation; scattered radiation; detector; scintillator; LED

Для оценки спектра рассеянного излучения, было проведено измерение спектров рассеянного излучения на расстоянии $\sim 0,5$ м от ОК во время получения радиографических изображений, при анодных напряжениях 50 и 150 кВ (рис. 6).

К сожалению, размеры спектрометра не позволяют измерить спектр рассеянного излучения непосредственно в точке расположения ЛД. Поэтому приведенные на рис. 6 данные можно рассматривать только с точки зрения качественной оценки энергии рассеянного излучения.

Выводы

Проведенные измерения позволили провести качественный анализ спектра рассеянного излучения и количественную оценку вклада рассеянного излучения в сигнал детектора при анодных напряжениях 150, 100 и 50 кВ. По радиографическим изображениям ступенчатого стального клина (толщиной от 1 до 15 мм) при анодном напряжении 50 кВ установлено, что уровень воздействия рассеянного рентгеновского излучения на линейку детекторов составляет до 50 ед. в кодах 16-разрядного АЦП.

1. Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Аертс В. И. и др. / Под ред. Клюева В. В. / Справ. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
2. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. // Справочник по ядерной физике. – Киев. Наук. думка, 1975. – 380 с.
3. Ryzhikov V. D., Opolonin O. D., Lysetska O. K., Galkin S. M., Voronkin Y. F., Perevertaylo V. L. Research on Improvement of Receiving-Detecting Circuit for Digital Radiographic Systems with Advanced Spatial Resolution / Internat. Symp. on Nondest. Testing of Materials and Structures. – Istanbul, Turkey, 15–18 May, 2011. – 6 (2013). – p.105–109.
4. Ryzhikov V. D., Opolonin A., Lisetskaya E., Kozin D. Digital radiography system with improved spatial resolution based on S-PD detectors / The 6-th Int. Conf. Slovenian Soc. NDT “Previous Experience and Current Innovation in Non-Destructive Testing // Conf. Proceeding 13–15 Sept 2001, Portoroz, Slovenia. – Pp. 89–96.
5. Рижиков В., Ополонин О., Пашико П., Пугачов Г. Рентгенографічна установка для контролю легкового і вантажного автотранспорту з поліпшеними радіаційними характеристиками / Вісн. Академії митної служби України. – 2000. – №4. – С. 79–86.
6. Ryzhikov V., Opolonin A., Lisetskaya E., Kozin D. et al. X-ray radiation detectors of Scintillator-photoreceiving device type for digital industrial radiography with improved spatial resolution» Symposium on Radiation Measurements and Application. – May 21–23, 2002, The University of Michigan. – P. 57
7. Рижиков В. Д., Ополонин А. Д., Лисецкая Е. К. Цифровая радиография для технической диагностики сварных соединений. – Оборудование и инструмент. – 2005. – № 10 (69). – С.30–32.

Поступила в редакцию
31.07.2015

СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ ПРОНИКАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

М.Л. КАЗАКЕВИЧ¹, А.И. СЕМЕНЕЦ², В.Я. ДЕРЕЧА², В.М. КАЗАКЕВИЧ¹

¹ ГП «КОЛОРАН» ИФХ им. Л.В. Писаржевского НАН Украины. 03028, г. Киев, пр-т Науки, 31. E-mail: mkazakevich@ukr.net

² ГП «АНТОНОВ». 03062, г. Киев, ул. Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Создание новых технологических процессов неразрушающего контроля подтверждает возможность решения задач, нетипичных для традиционного направления применения пенетрантов, например, диагностики ударов самолетов с птицами, поиска начальных очагов коррозии под лакокрасочными покрытиями, исследования топологии течей и др. Библиогр. 12, рис. 3.

Ключевые слова: контроль авиационной техники проникающими веществами, люминесцентный метод, нарушение герметичности, течи, диагностика, механические повреждения

Метод неразрушающего контроля (НК) проникающими веществами является одним из старейших и наиболее широко используемых приемов диагностирования авиационной техники [1–4]. Так, 100%-ный люминесцентный контроль целостности лопаток турбин авиационных двигателей введен в нормативную отраслевую документацию [5,6], а цветной капиллярный контроль применяют для обязательной проверки элементов силовых конструкций.

Уникальные характеристики метода поиска несплошностей с использованием проникающих веществ – пенетрантов – позволяют выявлять трещины, поры и другие поверхностные дефекты с шириной раскрытия в доли микрона. Такая чувствительность недоступна другим известным методам НК.

В качестве примера использования метода проникающих веществ в авиации можно привести технологический процесс проверки качества деталей и отливок из цветных сплавов и нержавеющей сталей люминесцентным методом ЛЮМ-18С. При его реализации в качестве проникающего вещества на протяжении многих лет применяли составы на основе керосина, в который добавляли так называемый нориол. Это – люминесцирующая фракция нефти, добываемой в Грузии на месторождении «Нори». В рамках работ по усовершенствованию метода проникающих веществ в Институте физической химии им. Л.В. Писаржевского НАН Украины предложена новая рецептура пенетранта. Взамен «нориола» использована добавка на основе синтетического люминофора – жидкость ЛЖ-6Ам, что позволило значительно улучшить характеристики техпроцесса контроля литья на серийном заводе ГП «АНТОНОВ» [7].

Особенно широко метод испытаний с помощью пенетрантов – РТ (penetrant testing) приме-

няют при контроле герметичности конструкции и систем самолетов «АН». Директивные технологические процессы (ДТП), разработанные с участием авторов, основаны на этом методе и более 30 лет применяются, например, при испытаниях крупнотоннажных транспортных самолетов.

Как известно, нарушение герметичности авиационных конструкций может приводить к проблемам, связанным с ограничением ресурса. Поэтому вопросам течеискания и устранения сквозных дефектов конструкции летательных аппаратов уделяют большое внимание [8–10]. Одним из примеров работ по усовершенствованию технологии поиска и восстановления герметичности является исследование топологии течей. На рис. 1 изображен элемент (бак-кессона) топливной системы самолета. Всю внутреннюю поверхность бака покрывают защитным слоем герметика массой в несколько тонн, который препятствует утечкам топлива. Однако многолетняя эксплуатация конструкции в условиях постоянных знакопеременных нагрузок приводит к появлению дефектов, нарушающих герметичность. В результате керосин проникает в повреждения изоляции, движется вдоль течи и, найдя выход, вытекает из конструкции, причем «выход» течи может на-

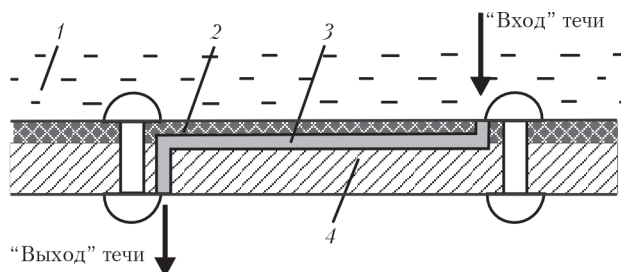


Рис. 1. Топология течи в бак-кессоне: 1 – топливо; 2 – герметик; 3 – канал течи; 4 – металлическая конструкция топливного бака



ходиться на значительном расстоянии от «входа». В результате технология ремонта герметичного контура, как правило, требует больших усилий по разборке крыла. Как оказалось, эта задача также может быть решена с помощью метода проникающих веществ.

Разработанная нами технология определения топологии состоит в следующем. Как правило, при эксплуатации авиатехники дефекты, нарушающие герметичность топливной системы самолета, обнаруживают по утечкам керосина. Следы топлива позволяют быстро определить расположение «выхода» течи. Далее проводят поиск «входа». Для этого устье («выход») течи обрабатывают пенетрантом, который хорошо совмещается с топливом. Под действием процесса диффузии он активно движется вдоль дефекта со скоростью до 10 см/мин, через некоторое время достигает «входа» течи и выходит из-под герметика.

При освещении внутренней поверхности бака источником ультрафиолетового света дефектоскопист легко обнаруживает и отмечает место расположения «входа» течи. Такая технология позволяет быстро найти и устранить (загерметизировать) течь, т.е. значительно снизить трудоемкость ремонта топливной системы.

Приведенные примеры НК проникающими веществами близки к традиционным. В развитие этого направления авторами предложен и ряд новых вариантов контроля РТ-методом.

Новые варианты контроля авиатехники РТ-методом. Одной из новых задач, решенных с помощью РТ-метода, является диагностика механических повреждений поверхности конструкции самолетов «АН» [11].

Анализ причин аварий авиационной техники показывает, что после технических отказов и человеческого фактора третье место в списке занимает повреждение конструкции самолетов вследствие столкновений с птицами. После изучения этого явления было установлено, что максимальное количество инцидентов происходит при взлете и посадке самолетов на высотах до 100 м. В результате могут быть повреждены элементы управления, фонарь и двигатели. Отмечены случаи катастроф, произошедших по этой причине.

Современные самолеты большой грузоподъемности из-за своих размеров не могут быть тщательно обследованы за время нахождения на аэродроме между полетами (т.е. за 1...2 ч). Поэтому разработка метода межполетной экспресс-диагностики поверхности летательного аппарата является очень актуальной. Эта задача была решена нами при помощи люминесцентного метода, использованного совместно с методом хрупких покрытий [12]. Метод хрупких покрытий состоит в определении мест ударов и возникающих при

этом механических напряжений. Для этого используют лаковые прозрачные покрытия, а информацию получают после изучения их растрескивания вследствие удара. Однако известные хрупкие индикаторные покрытия по разным причинам не могли быть использованы в авиации. Выход был найден после изучения лакокрасочных материалов, применяемых в авиационной технике. Для наших целей наиболее подходящим оказался акриловый лак АК-113. Он дает прозрачную пленку, характеризующуюся высокой адгезией к неокрашенной поверхности и штатным лакокрасочным покрытиям (ЛКП). Однако трещины в таком лаковом слое малозаметны, поэтому было предложено модифицировать лак гидрофильным люминофором.

При подготовке самолета к эксплуатации его поверхность покрывают модифицированным лаком и сушат. Если после удара смочить исследуемую поверхность водой, то влага проникает в трещины покрытия и растворяет люминофор, который выходит на поверхность и хорошо виден в ультрафиолетовом свете. Подбирая состав лака, можно легко проводить экспресс-диагностику мест столкновений самолета с птицами (рис. 2).

Другим ярким примером нетрадиционного испытания авиатехники с применением пенетрантов может служить технология определения расположения начальных очагов коррозии под ЛКП. Особенно актуальна такая задача при эксплуатации морской авиации. Когда «летающая лодка» садится на морскую поверхность, механические удары большой интенсивности воздействуют на поверхность самолета одновременно с коррозионным воздействием морской соленой воды. Такой синергический эффект рано или поздно приводит к развитию коррозии под защитным ЛКП. И для практики эксплуатации крайне важно выявлять начальные очаги коррозионного поражения. При решении данной задачи нами был использован химический метод, который заключался в следующем. Любое защитное ЛКП в той или иной степе-



След от удара птицы

Рис. 2. Механические повреждения конструкций самолета, возникающие при столкновении с птицами



Рис. 3. Определение очагов коррозии под ЛКП
ни содержит дефекты. Если поверх ЛКП нанести индикаторное покрытие, включающее активные компоненты, то они подрастворяют продукты коррозии металла конструкции под ЛКП, которые диффундируют через дефекты обратно. Входящий в состав индикаторного покрытия химический индикатор взаимодействует с продуктами коррозии металла конструкции с образованием цветных или люминесцирующих продуктов. Наблюдая их, дефектоскопист может визуально определить наличие коррозии под ЛКП (рис. 3).

Таким образом, стало возможным реализовать тестирование состояния конструкции «летающих лодок» без применения спецоборудования, например, токовихревых дефектоскопов.

Выводы

Метод НК с применением проникающих веществ традиционно используют в авиации. Уникальные возможности РТ-метода позволяют при-

Development of new NDT technologies confirms the possibility of solving problems uncharacteristic for the traditional direction of penetrant application, for instance, diagnostics of aircraft collision with birds, detection of initial corrosion sites under lacquer-paint coatings, investigation of leak topology, etc.

Keywords: penetrant testing of aviation equipment, luminescence flaw detection, tightness violation, leaks, diagnostics, mechanical damage

менять его для решения широкого круга задач дефектоскопии авиатехники, в том числе для выявления поверхностных дефектов субмикронных размеров.

Работы авторов по созданию новых технологических процессов неразрушающего контроля подтверждают возможность решения задач, нетипичных для традиционного направления применения пенетрантов, например, диагностики ударов самолетов с птицами, поиска начальных очагов коррозии под лакокрасочными покрытиями, исследования топологии течей и др.

1. *Неразрушающий контроль*. Справ. В 8 т. – Под. ред. В.В. Клюева. – Машиностроение, 2006. – 850 с.
2. *ГОСТ 18442–80*. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
3. *ОСТ 1.90282–79*. Качество продукции. Неразрушающий контроль. Капиллярные методы.
4. *ОСТ 1.90243–83*. Капиллярные методы неразрушающего контроля. Маркировка.
5. *ГОСТ 26182–84*. Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течеискания.
6. *ОСТ 26–5–88*. Цветной метод контроля сварных соединений наплавленного и основного металла.
7. *Типовой технологический процесс неразрушающего контроля*. Контроль деталей и отливок из цветных сплавов и нержавеющей сталей люминесцентным методом ЛЮМ-18С. – Киев: ГП «АНТОНОВ», 2014. – 20 с.
8. *Запунный А. И., Фельдман Л. С., Роголь В. Ф.* Контроль герметичности конструкций. – Киев: Техника, 1976. – 120 с.
9. *ГОСТ 26182–84*. Люминесцентный метод течеискания.
10. *Маслов Б.Г.* Дефектоскопия проникающими веществами. – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.
11. *Диагностика механических повреждений поверхности конструкции самолетов «АН»*. Технолог. инструкция. – Киев: ГП «АНТОНОВ», 2014.
12. *ГОСТ 4765–73*. Материалы лакокрасочные. Метод хрупких покрытий. Определение прочности пленок при ударе.

Поступила в редакцию
19.05.2015

ПРИНЦИПИ ПРАКТИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛУ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

І.П. БЛОКУР, Н.А. МЕДВЕДЄВА, О.В. РАДЬКО

Нац. авіац. ун-т. м. Київ, пр-т космонавта Комарова, 1. E-mail: nau_quality@ukr.net

Розглянуто принципи практичного навчання студентів дефектоскопічного спрямування, направлені на ініціативність, самостійність, творчий пошук, які необхідні в науково-дослідницькій та професійно-практичній діяльності. Рекомендовано використовувати інтерактивні та бінарні принципи, що дозволяють студентам моделювати та прогнозувати поведінку об'єкта контролю і обирати оптимальні варіанти й стратегії дефектоскопічної діяльності. Бібліогр. 12, рис. 3.

Ключові слова: фахівець, компетентність, неруйнівний контроль, дефектоскопія, навчальний процес, якість навчання

Постановка проблеми. Професійний розвиток особистості, розвиток персоналу належать до основних показників прогресивного розвитку суспільства, вирішальних важелів науково-технічного прогресу. Тому в країнах з розвинутою ринковою економікою дедалі більше компаній перебирають на себе ініціативу щодо подальшого розвитку персоналу своїх організацій. Планування та організація розвитку персоналу стають важливими функціями служби управління персоналом. Наслідкування Україною цього прикладу є обов'язковою умовою забезпечення в державі сталого економічного зростання.

Європейська федерація неруйнівного контролю (EF NDT) розробила документ «Комплексна система якості неруйнівного контролю» (сайт EF NDT www.efndt.org), який використовують як керівництво з систем досягнення якості у НК. У документі приведені рекомендації до розробки навчальних програм з освоєння теоретичних і практичних знань при проведенні учбових курсів та схем сертифікації персоналу на перший, другий та третій рівні кваліфікації. Рекомендації оформлені як документ «SNT TC 1A», але в ньому не приведені сучасні принципи практичної підготовки.

Практична підготовка фахівців за принципами наскрізності, наступності та безперервності відповідно до освітньо-кваліфікаційних рівнів детально розкрито в наукових працях [1–4]. У працях Н.Рідей [4] обґрунтовано теоретико-методологічні та практичні аспекти ступеневої підготовки, запропоновано основні напрями формування ступеневої підготовки та модель професійно-практичної підготовки майбутніх фахівців.

Виклад основного матеріалу. Систему професійно-практичної підготовки розробляють за

принципами дидактики, яка включає в себе зміст навчання, принципи, методи, форми та засоби практичної підготовки [5, 6].

Принципи практичного навчання – це система вихідних положень, що визначають закономірності формування знань, умінь і навичок у практичній підготовці, здатність до удосконалення та самореалізації у професійному середовищі. До принципів відносять:

- специфічні: безперервність, ступеневість, наскрізність, єдність теорії і практики;
- загальнодидактичні: гнучкість, динамічність, системність, створення сприятливого середовища.

Принципи навчання при практичній підготовці – це засоби спільної діяльності викладача і студента, за допомогою яких досягається набуття студентами практичних знань, умінь і навичок, професійної майстерності, виховуються навички моральної поведінки, розвиваються розумові і фізичні сили, творчі здібності. Практичне значення принципів полягає в тому, що вони полегшують вибір методу навчання для досягнення певної конкретної цілі.

Разом з тим кожен принцип має відповідну функцію (рис. 1): навчально-виховну (принцип за джерелом інформації та за ступенем творчої активності), освітньо-розвивальну (принципи за логікою пізнання та сприймання; принципи за рівнем самостійно-пізнавальної діяльності), аналітично-пошукову (інтерактивні та ситуаційні принципи практичного навчання), мотиваційно-стимулюючу (принципи стимулювання і мотивації), закріплювальну (контроль і самоконтроль) та діагностико-коригуючу функцію (бінарні принципи практичного навчання).

Методи на основі джерел інформації поділяються на словесні, наочні та практичні [7].

За допомогою словесних методів інформацію отримують шляхом бесіди-діалогу викладача та студента, розповіді, що передбачає оповідну, опи-

сову форму розкриття навчального матеріалу для спонукання студентів до створення в уяві певного образу, та пояснення, за допомогою якого педагог розкриває сутність певного явища виникнення дефектоскопічної ситуації, фізичних явищ взаємодії фізичних полів з матеріалом об'єкта контролю, процесів отримання та обробки дефектоскопічної інформації та оцінки якості виробу [8].

Наочні принципи застосовують для одержання інформації за допомогою демонстрування та ілюстрації, показу моделей виробу, зразків та еталонів, на яких реалізується методика контролю зі спостереженням за результатами.

Ілюстрація – принцип навчання, за якого предмети й процеси дефектоскопічних досліджень розкриваються через їх символічне зображення (світлина, малюнки, схеми, графіки та ін.). Спостереження як метод навчання передбачає сприймання певних предметів вивчення сучасних фізичних методів контролю, закономірностей взаємодії фізичних полів з матеріалом виробу і процесів реалізації методів та засобів контролю у виробничому середовищі без втручання у ці явища і процеси.

Демонстрація передбачає показ теоретичних та практичних аспектів дефектоскопії в динаміці. За допомогою наочних принципів студенти одержують інформацію про дефектоскопію як науку з визначення показників якості матеріалу, виробу, конструкції, середовища та закономірності їх впливу на працездатність або безпечність при

використанні. Практичні принципи допомагають студенту отримати інформацію за допомогою практичних відповідних вправ (виробничо-практичні, творчо-пошукові, контрольні), лабораторно-практичних та експериментально-дослідних робіт. Особливість практичних принципів у тому, що на основі одержаних знань студенти здобувають практичні вміння з методів дефектоскопічних досліджень об'єктів контролю, методології проведення експериментально-дослідних та виробничих робіт [9].

Також сприяють формуванню навичок встановлення причинно-наслідкових взаємозв'язків факторів, що призводять до утворення дефектів, документування дослідницького процесу; встановлення меж стійкості виду дефектів та їх вплив на фізико-механічні властивості матеріалу; аналізу розташування дефектів, що належать до різних видів даного угруповання. Практичні методи навчання спрямовані на досягнення логічного завершення ланки пізнавального процесу щодо конкретної теми чи розділу дослідження [10].

За ступенем творчої активності студентів (рис. 1) можна видокремити імітаційні принципи практичного навчання. Вони передбачають використання такої системи методів, яка спрямована переважно не на викладання готових знань і їх відтворення, а на самостійне оволодіння студентами знаннями в процесі активної пізнавальної діяльності. Імітаційні принципи охоплюють ділові ігри фундаментально-професійного та си-



Рис. 1. Принципи практичного навчання студентів дефектоскопічного спрямування

темно-конструктивного напрямку, принцип «лабіринту дій», принцип круглого столу. Фундаментально-професійні ділові ігри спрямовані на імітаційне моделювання реальних процесів і механізмів, які можливі у професійній діяльності. Ділові ігри системно-конструктивного напрямку, окрім моделювання реальності дефектоскопічної ситуації чи стану об'єктів контролю, дають змогу моделювати певні процеси, механізми для їх експериментального дослідження.

Принцип «круглого столу» використовується для проведення міждисциплінарних занять для обговорення складних теоретично-практичних проблем, пов'язаних зі збереженням конструкції та охороною навколишнього природного середовища з обміном досвідом. Даний принцип формує у студентів навички комунікабельності, професійні та творчі здібності до навчально-творчої діяльності, розвивають швидкість та гнучкість мислення, самостійну наполегливість, ініціативність та винахідливість. Метод лабіринту дій удосконалює вміння працювати з різноманітною інформацією в умовах обмеженої її кількості та часу, формує навички й уміння правильно оцінювати обстановку, вибирати певну лінію поведінки, ухвалювати правильне і своєчасне рішення у дефектоскопічних дослідженнях.

Відповідно до логіки пізнання та сприймання в навчальному процесі використовують принципи, спрямовані на освітньо-розвивальну діяльність, а саме аналітичний, синтетичний, індуктивний та дедуктивний принципи.

Аналітичний принцип передбачає практичний розклад кількісних показників і властивостей стану матеріалу виробу і середовища існування та виявлення залежності між ними. Тобто аналітичний принцип передбачає виділення конкретних проблем вивчення, елементів чи властивостей фізичних явищ чи процесів вивчення для встановлення їх суттєвих ознак. Продовженням цього принципу є принцип синтезу, який ґрунтується на встановленні чи поєднанні функціональних зв'язків між дефектами та міцністю або надійністю виробу [10].

Синтез є органічним продовженням аналізу й може будуватися лише на його основі. Поряд з аналізом та синтезом використовують у практичному навчанні індуктивний та дедуктивний принципи.

В основу *індуктивного принципу* покладено пізнання окремих предметів і явищ шляхом їх порівняння, встановлення подібності та відмінності, а також встановлення їх закономірних взаємозв'язків. Дедуктивний принцип є протилежним індуктивному, в основу якого покладено системний підхід до вивчення розмірних параметрів та/або діагностичних компонентів виробу, що дає змогу вирішити проблеми збереження дієздатно-

сті виробу і його безпечності. Принципи практичного навчання за рівнем самостійно-пізнавальної діяльності ґрунтуються на послідовній і цілеспрямованій постановці перед студентами проблемних дефектоскопічних завдань. До них відносять проблемно-інформаційний, проблемно-пошуковий та дослідницький принципи, які розвивають у студентів здібності до професійно-практичної діяльності протягом всього навчально-виховного процесу. Ці принципи спрямовані на отримання студентом нових знань шляхом послідовного та цілеспрямованого викладення викладачем проблемних дефектоскопічних завдань.

Проблемно-інформаційний принцип передбачає створення викладачем дефектоскопічної ситуації, для реалізації якої застосовують різні підходи, зокрема, популярний, дефсистемний, еволюційний, історичний чи експериментальний, які дають найбільш характерну інформацію. Цей метод допомагає активізувати мислення студентів та спрямувати їх увагу на проблематику досліджень.

Проблемно-пошуковий принцип передбачає створення викладачем дефектоскопічної ситуації, для вирішення якої застосовують різні фізичні методи дослідження та засоби здійснення, зокрема, фізичні, хімічні, механічні, металографічні, діагностичні та ін. Він спрямовує студентів до послідовного та цілеспрямованого вирішення інформативно-діагностичної проблематики з контролю якості, стимулює дефектоскопічну свідомість та пізнавальну їх діяльність.

Дослідницький принцип спонукає студентів до науково-дослідної діяльності, систематизації результатів проведеної науково-практичної роботи, а також до самостійного осмислення способів пізнання навколишнього світу, одержання об'єктивних фактів та їх тлумачення, вчить студентів самостійно опрацьовувати наукові джерела, проводити спостереження та здійснювати експериментально-дослідні проекти, виконувати інші дії пошукового характеру.

Ці принципи характеризуються ініціативністю, самостійністю, творчим пошуком, які виявляються в науково-дослідницькій та професійно-практичній діяльності. Запровадження *інтерактивних принципів* (див. рис. 1) у практичній підготовці дозволяє сформувати у студентів відповідне бачення, тип мислення до дефектоскопічної проблематики, стимулює їхню професійно-практичну діяльність під час проходження навчальних та науково-дослідних практик. До інтерактивних принципів відносять кейс-метод (полягає у використанні конкретних випадків (ситуацій, обставин, станів, що називаються «кейсом») для спільного аналізу, обговорення або вироблення рішень студентами певного виду професійно-практич-

ного навчання; сприяє формуванню вмій та навичок оцінювання ситуації, вибору та організації пошуку основної інформації, всебічного аналізу дефектоскопічних ситуацій за допомогою діагностичного підходу, прогнозування способів їх розвитку, стимулює індивідуальну активність студентів, формує позитивну мотивацію до практичного навчання та формує певні особисті та практичні якості), метод сценаріїв (сприяє формуванню у студентів готовності до публічного виступу із представленням та захистом запропонованого рішення), мозковий штурм (ґрунтується на груповому формуванні ідей вирішення певного дефектоскопічного завдання, спрямованого на колективне продукування нових ідей), роботу в малих групах (сприяє ефективному засвоєнню отриманих професійно-практичних знань, ефективному перерозподілу їх обов'язків, закріпленню умій та навичок у керуванні колективом [11]). *Ситуаційні принципи* дозволяють розвинути у студентів вміння аналізувати конкретну ситуацію, послідовно та цілеспрямовано здійснювати дефектоскопічні дослідження та розв'язувати ситуаційні завдання, формують соціально активну і життєво компетентнісну творчу особистість, здатну до саморозвитку, самовдосконалення і самореалізації. *Принципи стимулювання і мотивації* спрямовані на формування позитивних мотивів практичного навчання, посилюють пізнавальну та мотиваційно-стимулюючу активність, стимулюють студентів до аналізу життєвих ситуацій, коли потрібно розібратися з якоюсь життєвою проблемою, наблизитися до практичного життя. Різноманітні прийоми стимулювання емоційних реакцій студентів у процесі практичної підготовки значною мірою сприяють більш повному включенню студентів у професійно-практичний процес та його активізації, сприяють формуванню вольових

якостей та цілеспрямованості. Застосування *принципів контролю і самоконтролю* допомагають побачити досить повну картину всього навчально-практичного процесу, сприяють виявленню рівня реальних досягнень студентів у професійно-практичному навчанні, формуванню у студентів особистих якостей, як то працьовитість, креативність, впевненість у собі, цілеспрямованість, комунікативність, готовність взяти на себе відповідальність за результати власного аналізу ситуації і за роботу всієї групи, зокрема, самостійно ухвалювати рішення в умовах невизначеності.

Бінарні принципи допомагають систематизовано комплексно вирішувати поставлені завдання, об'єднуючи різні методи професійно-практичного навчання студентів, також дозволяють студентам моделювати та прогнозувати поведінку об'єкта контролю в цілому, правильно обирати оптимальні та дефектоскопічно прийнятні варіанти й стратегії діагностичної діяльності, застосовувати системно-структурний підхід до дефектоскопічних досліджень.

Процес професійно-практичного навчання передбачає застосування різноманітних засобів навчання (рис. 2), за допомогою яких більш успішно і швидко можна досягти поставлених цілей. До таких засобів практичного навчання студентів дефектоскопічного спрямування належать графічні (діаграми, схеми, моделі, формули, графіки, постери, у тому числі і в електронному вигляді), технічні (відеомагнітофони, мультимедія, інформаційні системи, телекомунікаційні мережі), лабораторно-інструментальні (лабораторне обладнання та інвентар, польове устаткування), науково-методичні засоби (підручники, навчальні посібники, практикуми, науково-методичні рекомендації з навчальних та виробничих практик). Засоби практичного навчання залежать від типу

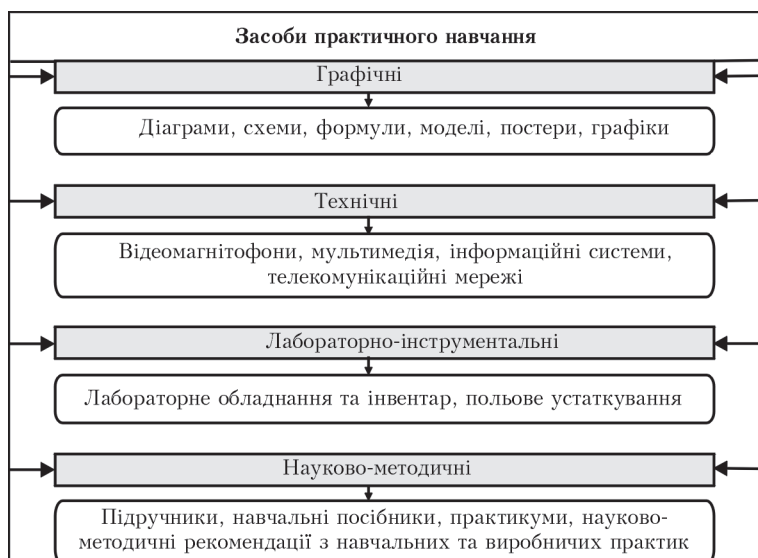


Рис. 2. Засоби практичного навчання студентів дефектоскопічного спрямування

конкретної дефектоскопічної ситуації та виду науково-дослідної роботи і спрямовані на здобуття навичок використання теоретичного матеріалу для аналізу практично-дослідних завдань; формування навичок оцінювання дефектоскопічної проблематики, вироблення вмій формулювати питання і відповіді; вироблення вмій розробляти багатоваріантні підходи до реалізації плану дії; формування вмій та навичок виконання лабораторно-практичних та науково-дослідних робіт.

Якщо зміст навчання відповідає на запитання «Чого навчати?», принципи охоплюють шляхи і засоби навчання, то форми показують найраціональнішу його організацію.



Рис. 3. Форми практичного навчання у професійно-практичній підготовці майбутніх дефектоскопістів

Під формами практичного навчання (рис. 3) розуміють різні варіанти організації і взаємодії студентів і керівників практики, зовнішні рамки їх взаємопов'язаної діяльності.

Використання різних форм і видів навчання сприяє формуванню високоосвічених, компетентних, мобільних, самоорганізованих, конкурентоспроможних майбутніх фахівців з НК, готових до сертифікації [12] та входженню в глобалізований світ, відкрите інформаційне товариство з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Застосування наведених принципів, засобів та форм практичного навчання полягає в тому, що вони одночасно відображають не лише практичну підготовку, а й актуалізують певний комплекс знань, який необхідно засвоїти при вирішенні низки дефектоскопічних проблем, а також вдало поєднують навчальну, аналітично-пошукову, науково-дослідну й виховну діяльність, що, безумовно, є дійовим і ефективним в реалізації підготовки сучасних висококваліфікованих фахівців, конкурентоспроможних на ринку праці. Подальшого дослідження потребує розробка алгоритму здійснення практичного навчання майбутніх фахівців з НК.

Висновки

Посібник, який розроблено спеціалістами ICNDT, з підготовки, атестації та сертифікації персоналу з НК є просуванням передового досвіду з атестації і сертифікації персоналу в галузі НК відповідно до вимог Міжнародного стандарту EN ISO 9712. Практична підготовка фахівців з неруйнівного

контролю проводиться за програмами підготовки, що складені з урахуванням рекомендацій, наведених у ISO TR 25107: 2006 «Неруйнівний контроль. Рекомендації щодо змісту програм підготовки з НК».

Компетентність персоналу НК, що досягнута при реалізації принципів практичного навчання, є ключовим елементом у надійності НК, і вона відіграє важливу роль у забезпеченні якості та безпеки різноманітної продукції та об'єктів контролю і має важливе значення для всіх рівнів кваліфікації персоналу з НК, для регулюючих та контролюючих органів і органів з сертифікації, сервісних компаній з НК та керівників персоналу НК.

Навчальні зразки, які використовуються для проведення практичних занять, являють собою реальні фрагменти виробів промислової продукції або деталей і вузлів устаткування підвищеної небезпеки, що дозволяє фахівцеві отримати певний досвід проведення практичного неруйнівного контролю вже безпосередньо в процесі практичної підготовки.

1. Носырева И. Г. Современные формы и методы обучения персонала // Управление развитием персонала. – 2006. – № 1. – С. 2–13.
2. Обзор современных методов обучения сотрудников. – Режим доступа: <http://www.rb.ru/community/articles/articles/2007/10/31/153006.html>
3. Крикунов С. Формы и методы обучения персонала. – Режим доступа: <http://www.hr-portal.ru/node/1638>
4. Ридей Н. М. Ступенева подготовка будущих экологов: теория и практика / За заг. ред. Д.О. Мельничука. – 2-е вид. перероб. і доп. – Херсон: Олді-плюс, 2011. – 650 с.
5. Сущность системы непрерывного обучения персонала: Режим доступа: <http://www.sevencrafts.ru/57-sushhnost-sistemy-nepreryvnogo-obucheniya-personala>.
6. Синенко Н. Об организации профессионального обучения в Нидерландах и Дании // Справочник кадровика. – 2007. – № 7. – С. 100–103.
7. Роберт И. В. Теория и методика информации образования (психолого-педагогический и технологический аспекты). – М.: НИО РАО, 2008. – 274 с.
8. Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль: Уч. пособ. – Киев: Вища шк., 1990. – 192 с.
9. Белокур И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и изделий. – Киев: Техника, 1989. – 196 с.
10. Белокур И. П. Элементы дефектологии при вивченні неруйнівного контролю: Навч. посіб. – Киев: НМК МО, 1990. – 252 с.
11. Сладкевич В. П. Стратегічний менеджмент організацій: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. – Киев: Персонал, 2008. – 496 с.
12. Белокур И. П. Сертифікація персоналу: Навч. посіб. – Київ: НАУ, 2014. – 364 с.

Надійшла до редакції
30.06.2015



ДНИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В БОЛГАРИИ

С 15 по 19 июня 2015 г. в г. Созополь (Болгария) прошли традиционные «Дни неразрушающего контроля» (далее «Дни»).

В работе «Дней» приняли участие более 220 специалистов из Болгарии, России, Республики Беларусь, Украины, Литвы, Латвии, Румынии, Польши, Македонии, Италии, Хорватии, Сербии. Сопредседателями Дней были президенты Российского (РОНКТД) и Болгарского (ННТДД) обществ неразрушающего контроля – академик Э.С. Горкунов и проф. д-р техн. Наук М. Миховски.

В программу «Дней» входили следующие мероприятия:

- XXX Международная конференция «Дефектоскопия'2015», научные руководители: профессор докт. техн. наук М. Миховски, академик Э.С. Горкунов;
- XXV Молодежная школа «Неразрушающий контроль структуры и физико-механических свойств материалов», научный руководитель: доцент докт. Й. Иванова;
- Болгаро-российский семинар «Диагностика электроэнергетических систем», научные руководители: доцент докт. Хр. Драганчев, профессор докт. техн. наук А. Назарычев;
- Семинар по проекту «INNOPIPES», научные руководители: профессор Е. Барканов, профессор М. Миховски;
- Круглый стол «Порошковая металлургия»;
- Семинар «Иновационные технологии и оборудование для НК»;
- Круглый стол «Развитие стандартизации в области НК»;
- Выставка средств для НК и др.

Началась работа с приветствий участникам президента ННТДД проф. М. Миховски, президента РОНКТД академика РАН Э.С. Горкунова,

заочного приветствия президента Украинского общества НКТД (УО НКТД) проф. В.А. Троицкого (зачитал М. Миховски), почетного члена ННТДД и почетного председателя Израильского общества по НК (ISRANDT) докт. Й. Шоефа, руководителя европейского проекта «INNOPIPES» (участниками проекта являются научные организации из Болгарии, Латвии, Польши, Румынии, Украины, России, Беларуси) проф. Е. Барканова, почетного члена ННТДД проф. В. Ковтуна (Республика Беларусь), а также представителей Санкт-Петербургского энергетического института повышения квалификации и Технического университета в Варне.

Во время открытия «Дней» были вручены следующие награды:

- диплом почетного члена Института механики Болгарской академии наук академику Э.С. Горкунову;
- приз ННТДД имени Сл. Попова магистру инженеру Й. Мирчеву за вклад в развитие научных исследований и активную работу в Обществе;
- диплом почетного члена ННТДД докт. техн. наук Александру Назарычеву;
- диплом почетного члена ННТДД докт. техн. наук Анне Поволоцкой;
- приз почетного члена ННТДД магистру инженеру Венетко Борисову.

Научная программа конференции включала более 135 докладов, которые после рецензирования будут напечатаны в журнале «Известия научно-технического общества машиностроения».

В работе выставки приняли участие 12 компаний производителей и поставщиков средств для НК.

Второй год подряд в рамках «Дней неразрушающего контроля» состоялся научный семинар по Европейскому проекту INNOPIPES (Седьмая ра-



Участники конференции во время пленарного заседания

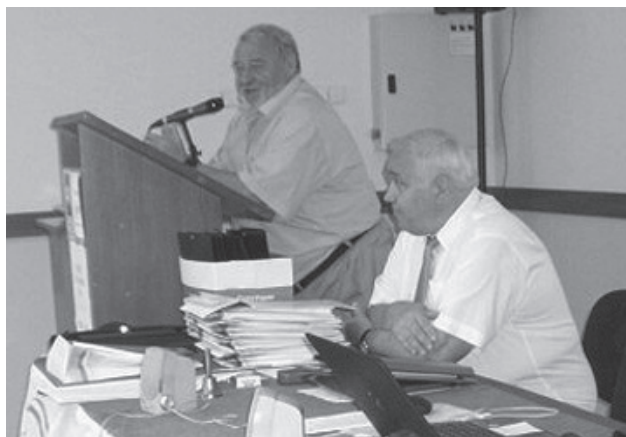


Член правления УО НКТД А.Г. Протасов приветствует участников «Дней»



Участники семинара по Европейскому проекту «INNOPIPER»

мочная программа Европейского союза), посвященного развитию современной технологии дальнействующего ультразвукового контроля для обнаружения коррозионных повреждений трубопроводов и разработке новых композиционных материалов для их ремонта. В семинаре принимали участие 11 специалистов из 5 стран – проф. М. Миховски, Ал. Алексиев, Й. Мирчев (Институт механики, София, Болгария); проф. Е. Барканов (Рижский техн. ун-т, Рига, Латвия); проф. Г. Львов, В. Огороков, И. Львов (НТУ „Харьковский политехн. ин-т”, Украина); проф. М. Чебаков, Е. Шинкаренко (Южный федеральный ун-т, Ростов-на-Дону, Россия), проф. В. Сергиенко, С. Бухаров (Институт механики металлополимер-



Сопредседатели «Дней» – Э.С. Горкунов и М. Миховски

ных систем, Гомель, Беларусь). На семинаре были представлены 9 научных докладов, касающихся проводимых по проекту исследований в области использования новых технологий УЗ контроля для обнаружения зон коррозионных поражений в трубопроводах, исследований механических характеристик материала трубопроводов и композитных материалов, исследований механических напряжений и механизмов коррозии с применением микроиндентации и моделирования на основе FEM.

На закрытии «Дней неразрушающего контроля» их организаторы сообщили, что следующая встреча состоится с 6 по 10 июня 2016 г. традиционно в Созополе и пригласили специалистов по НК разных стран принять в ней участие (информация на сайте ННТДД: www.bg-s-ndt.org).

Й. Мирчев, А.Алексиев, Ин-т механики БАН, А.Шекеро, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

НОВОСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В конце апреля 2015 г. в Будапеште состоялась Генеральная ассамблея Европейской федерации по неразрушающему контролю (EFNDT), на которой прошли выборы нового президента, вице-президента, членов Совета директоров и секретаря на следующие три года.

Новым президентом EFNDT был избран проф. Peter Trampus – бывший вице-президент EFNDT и президент Венгерской ассоциации неразрушающего контроля (MAROVISZ).

Состав Совета директоров EFNDT, избранно-



го на Генеральной ассамблее EFNDT 29 апреля 2015 г.:

Президент: Peter Trampus (Венгрия); **Вице-президент:** Roger Lyon (Великобритания).

Голосующие члены Совета директоров: Gerhard Aufrecht (Австрия); Miro Džaro (Хорватия); Tony Erhard (Германия); Fermin Gomez (Испания); Etienne Martin (Франция); Dominique Moussebois (Бельгия); Alexander Mullin (Россия); Goran Sofronić (Сербия).

Неголосующие: генеральный секретарь: Annamaria Nagy (Венгрия); последний президент: Matthias Purschke (Германия); кооптированный член: Emilio Romero (Испания); кооптированный член: Vjera Krstelj (Хорватия); пресс-секретарь: David Gilbert (Великобритания); президент 12-й ECNDT: Peter Merck (Швеция).



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ПО МЕХАНИКЕ В ПОЛЬШЕ

21-я Международная конференция по компьютерным методам в механике и 3-й Польский конгресс по механике состоялись в Гданьске (Польша) с 7 по 12 сентября 2015 г.

Организаторы конференции – *Польская академия наук, Польское общество теоретической и прикладной механики, Гданьский университет технологий, Польская ассоциация вычислительной механики* – провели большую подготовительную работу и собрали около 600 участников из Польши, Австрии, Великобритании, Венгрии, Германии, Греции, Дании, Израиля, Ирана, Италии, Канады, Китая, Латвии, Литвы, Нигерии, Нидерландов, Португалии, России, Словакии, США, Турции, Украины, Финляндии, Франции, Хорватии, Черногории, Чехии, Швейцарии, ЮАР, Японии.

Идея Польского конгресса по механике была впервые предложена в 2005 г. Польским обществом теоретической и прикладной механики. Тематика конгресса была призвана покрыть весь спектр проблем теоретической, экспериментальной и вычислительной механики, а также ее промышленные приложения.

21-я Международная конференция по компьютерным методам в механике продолжила 44-летнюю историю конференций, посвященных применению численных методов и их приложений к решению задач механики. На форумах, проходящих с 1973 г., обсуждаются новые идеи, относящиеся к теоретическим основам и практическому применению вычислительной механики.

Оба события – 3-й Польский конгресс по механике и 21-я конференция по компьютерным методам в механике – направлены на представление текущих исследований в области механики и предоставление широкой площадки для обсуждения новых идей по теории, современным технологиям и вычислительным методам в механике и смежных дисциплинах.

Тематика форума включала следующие вопросы. *Механика твердых и жидких сред:* адаптивные, функциональные, умные материалы и наноматериалы; механика композиционных, многофазных и пористых материалов; межфазная и контактная механика; динамика многотельных и мультитекущих систем;

эволюция микроструктуры: турбулентность, реология, пластичность, ползучесть и повреждения; механика пластин и оболочек; нестационарный отклик жидкостей и твердых тел на экстремальные воздействия; нелинейная динамика, хаос.

Вычислительные подходы в механике: методы искусственного интеллекта; чувствительность и надежность анализа; обратные задачи и оптими-

зация; расширенный метод конечных элементов, метод конечных объемов и метод граничных элементов; бессеточные и связанные с ними методы; аналитические методы.

Междисциплинарные вопросы механики: *жидкости* – структурные взаимодействия; биомеханика; проблемы сочетания полей; мехатроника; деформация и управление потоком; многомасштабные проблемы и наномеханика; вопросы обучения; форум молодых ученых в области механики.

Программа форума включала общие лекции и 25 минисимпозиумов (пленарных и секционных заседаний).

С общими лекциями выступили ученые из Технического университета Лиссабона (Португалия), Технического университета Эйндховена (Нидерланды), Бременского университета (Германия), Института фундаментальных технических исследований Польской академии наук, Познаньского технологического университета (Польша), Европейской организации ядерных исследований (CERN, Швейцария), Краковского технического университета (Польша), Штутгартского университета (Германия), Университета Удины (Италия), Технического университета Люнгбю (Дания).

Всего на конференцию было представлено 478 докладов, которые опубликованы в кратком виде в двух томах материалов конференции.

Благодаря поддержке Европейского научного проекта «Инновационные технологии неразрушающего контроля трубопроводов с объемными поверхностными дефектами и их ремонта композитными материалами – INNOPIPES», выполняемому в рамках 7-й Рамочной программы ЕС, в конференции приняли участие и авторы этого краткого отчета. Наш доклад «Strength of damaged T-joint under low-cycle loading» (Прочность поврежденного тройникового соединения при многоцикловом нагружении), посвященный результатам исследований, выполняемых по проекту, был включен в программу конференции и заслушан на минисимпозиуме «Тонкостенные структуры».

Выполнению работ по проекту «INNOPIPES» было также посвящено рабочее совещание в Военном университете технологий (Варшава) с нашими польскими коллегами.

Для участников конференции была подготовлена насыщенная культурная программа: камерный концерт и торжественный прием в Польской Балтийской филармонии, экскурсия по старому городу Гданьска, экскурсия в Мальборкский замок.

*А.Л. Шекеро, П.С. Юхимец
Ин-т электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины*

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 15.09.2015. 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.