

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б.Е. ПАТОН

Ученые ИЭС им. Е.О. Патона

к.ф.-м.н. **О.И. Бойчук**,
к.т.н. **Е.А. Давыдов**, к.ф.-м.н. **А.Т. Зельниченко**,
д.т.н. **Л.М. Лобанов**,
д.т.н. **А.Я. Недосека** (зам. гл. ред.),
Ю.Н. Посыпайко,
д.т.н. **В.А. Троицкий** (зам. гл. ред.),
к.т.н. **Е.В. Шаповалов**

Ученые институтов и университетов Украины

д.т.н. **В.А. Стрижало**

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

к.х.н. **М.Л. Казакевич**

Ин-т физической химии, Киев, Украина

д.т.н. **О.М. Карпаш**

Ив.-Франк. НТУ нефти и газа, Украина

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

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

д.т.н. **Г.И. Прокопенко**

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

д.т.н. **В.А. Стороженко**

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

д.п.н. **А.Т. Протасов**, д.т.н. **С.К. Фомичов**

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев

д.т.н. **М.Г. Чаусов**

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

Зарубежные ученые

д.т.н. **Н.П. Алешин**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ

д.т.н. **В.Л. Венгринович**

Ин-т прикл. физики, Минск, Республика Беларусь

д.т.н. **В.В. Ключев**

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев, 03150, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

К.Г. Григоренко, Т.В. Юштина

Электронная верстка

Л.Н. Герасименко, Д.И. Серета

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

ISSN 0235-3474

Doi.org/10.15407/tdnk

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

СОДЕРЖАНИЕ

Выставка-конференция «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2019»..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Почапский Е.П., Клим Б.П., Мельник Н.П., Великий П.П., Долишний П.М.
Оценка влияния механических свойств конструкционных ферро-
магнитных материалов и их сварных соединений на изменение
параметров магнитоупругой акустической эмиссии 7

Близнюк Е.Д., Куц Ю.В., Монченко Е.В., Олейник Ю.А.
Повышение достоверности обнаружения сигналов ультразвуковой
эхо-импульсной толщинометрии при их значительном затухании..... 13

Михайлов С.Р. Исследование чувствительности выходных
параметров рентгенотелевизионной системы к изменениям
входных параметров..... 18

Порев В.А., Томашук А.С. Измерение температуры и диаметра
участка нагретого изделия 23

Овчарук С.А., Баженов В.Г. Сравнение чувствительности моделей
обычных и дифференциальных электроемкостных преобразова-
телей в рамках задач гражданского разминирования 30

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*Яременко М.А., Недосека А.Я., Недосека С.А., Овсиенко М.А.,
Сараев А.Е.* Метод акустической эмиссии при контроле
объектов нефтехимии..... 37

*Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С., Дидковский А.В.,
Антипин Е.В.* Система управления процессом контактной сварки
оплавлением рельсов в стационарных и полевых условиях для
повышения ресурса и надежности железнодорожных путей 41

Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. Чувствительность
ультразвукового контроля ЭМА способом при выявлении есте-
ственных внутренних дефектов металлоизделий. Возможности
толщинометрии (Обзор ч. 3) 51

ХРОНИКА

Международная конференция «Инновационные технологии и
инжиниринг в сварке и родственных процессах – PolyWeld 2019»..... 58

Международная конференция «Материалы для сварки,
наплавки, нанесения покрытий и 3D-технологий»..... 59

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА і НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Виходить 4 рази на рік

Quarterly issue

Головний редактор Б.Є. Патон

Editor-in-Chief B.E. Paton

ЗМІСТ

Виставка-конференція
«Неруйнівний контроль-2019» 3

Exhibition-conference
«Nondestructive Control-2019»3

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Почапський Є.П., Клим Б.П., Мельник Н.П., Великий П.П., Долишній П.М. Оцінювання впливу механічних властивостей конструкційних феромагнетних матеріалів та їх зварних з'єднань на зміну параметрів магнетопружної акустичної емісії 7

SCIENTIFIC-TECHNICAL

Pochapskyi Ye.P., Klym B.P., Melnyk N.P., Velykiy P.P., Dolishnii P.M. Assessment of the influence of mechanical properties of structural ferromagnetic materials and their welded joints on the change of parameters of magnetoelastic acoustic emission 7

Близнюк Е.Д., Куц Ю.В., Монченко О.В., Олійник Ю.А. Підвищення достовірності виявлення сигналів ультразвукової луна-імпульсної товщинометрії за їх значного загасання 13

Bliznyuk E.D., Kuts Yu.V., Monchenko O.V., Oliynik Yu.A. Improvement of validity of detection of signals of ultrasonic pulse-echo thickness measurement at their considerable attenuation 13

Михайлов С.Р. Дослідження чутливості вихідних параметрів рентгенотелевізійної системи до зміни вхідних параметрів 18

Mikhailov S.R. Investigation of the sensitivity of output parameters of X-ray television system to the change of input parameters 18

Порев В.А., Томашук О.С. Вимір температури та діаметра ділянки нагрітого виробу 23

Porev V.A., Tomashuk A.S. Measurement of temperature and diameter of a heated item section23

Овчарук С.А., Баженов В.Г. Порівняння чутливості моделей звичайних та диференціальних електроємнісних перетворювачів в рамках задач цивільного розмінування 30

Ovcharuk S.A., Bazhenov V.G. Comparison of the sensitivity of models of conventional and differential capacitive transducers within humanitarian demining tasks30

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Яременко М.А., Недосєка А.Я., Недосєка С.А., Овсієнко М.А., Сараєв А.Є. Метод акустичної емісії при проведенні контролю об'єктів нафтохімії 37

INDUSTRIAL

Yaremenko M.A., Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., Ovsienko M.A., Saraev A.E. Method of acoustic emission at testing of petrochemical facilities37

Кучук-Яценко С.І., Руденко П.М., Гавриш В.С., Дідковський О.В., Антіпін Є.В. Система керування процесом контактного зварювання оплавленням рейок у стаціонарних і польових умовах для підвищення ресурсу та надійності залізничних колій 41

Kuchuk-Yatsenko S.I., Rudenko P.M., Gavrish V.S., Didkovskiy O.V., Antipin E.V. System of controlling the process of flash-butt welding of rails under stationary and field conditions to extend the service life and reliability of railway tracks41

Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Плеснецов С.Ю. Чутливість ультразвукового контролю ЕМА методом при виявленні природних внутрішніх дефектів металовиробів. Можливості товщинометрії (Огляд ч. 3) 51

Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Plesnetsov S.Yu. Sensitivity of ultrasonic testing by electromagneto-acoustic technique at detection of natural internal defects of metal products. Possibilities of thickness measurement. (Review p. 3).....51

ХРОНІКА

Міжнародна конференція «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2019» 58

NEWS

International Conference «Innovation Technologies and Engineering in Welding and Related Processes – PolyWeld 2019»58

Міжнародна конференція «Матеріали для зварювання, наплавлення, нанесення покриттів та 3D-технологій» 59

Conference «Consumables for Welding, Surfacing, Coating and 3D Technologies»59

Адреса редакції

03150, Україна, м. Київ, вул.Казимира Малевича, 11
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Address

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

ВЫСТАВКА-КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2019»

15-16 мая в Киеве состоялась выставка-конференция «Неразрушающий контроль-2019» – ежегодное традиционное мероприятие, организатором которого с 1993 г. является Ассоциация «ОКО». Мероприятие проводилось при участии предприятий, входящих в Ассоциацию: «Ультракон-Сервис», «Промприлад», Украинского научно-исследовательского института неразрушающего контроля (УкрНИ-ИНК) и поддержке Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики.

Конференция «Неразрушающий контроль-2019» собрала наибольшее количество гостей за последние годы. Среди участников около 150 специалистов в области неразрушающего контроля предприятий и учреждений различного профиля, ученые и менеджеры коммерческих структур со всех регионов Украины, Эстонии, Литвы, Молдовы. Они представляли такие известные предприятия и компании, как ПАО «Укрзализныця», АО «Литовская железная дорога», АО «Эстонская железная дорога», Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, КП «Киевский метрополитен», ГП «Антонов», ГП НАЭК «Энергоатом», ЧАО «Днепровагонмаш», ООО «ДТЭК», ГП «Трансгаз», ПАО «Интерпайп», «Метинвест», ПАО «Лемтранс», ГП «Завод им. Малышева», ГП «Укрметртестстандарт», ГП «Одесский авиационный завод», ПАО

«Азовсталь», ООО «Атом Тест», ЧАО «Северодонецкое объединение Азот», ЧАО «Ровноазот», КП «Киевтеплоэнерго», ОП «Атомремонтсервис» и др.

Целью конференции являлась демонстрация новых разработок в области неразрушающего контроля, а также обсуждение взаимодействия при разработке и проектировании нового оборудования.

На специализированной выставке было представлено оборудование для неразрушающего контроля, разработанное и произведенное предприятиями Ассоциации «ОКО» – современные многофункциональные ультразвуковые и вихретоковые дефектоскопы, твердомеры, ультразвуковые толщиномеры, ультразвуковые и вихретоковые преобразователи, механизированный комплекс для неразрушающего контроля рельсовых путей, колесных пар и др.

Открыла конференцию председатель оргкомитета выставки-конференции, генеральный директор Ассоциации «ОКО» Луценко Татьяна Михайловна. Она подчеркнула, насколько важно сохранять традицию ежегодного проведения таких мероприятий, поскольку именно здесь специалисты в области неразрушающего контроля (НК) знакомятся с новейшими моделями оборудования и делятся мнениями и предложениями.



Открытие конференции. Луценко Т.М. и Троицкий В.А.

ECNDT 2018 Швеция



InnoTrans 2018, Берлин, Германия



ASNT 2018, Хьюстон, Техас



APCNDT, Сингапур



С приветственным словом выступил председатель Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики д.т.н., проф. Троицкий Владимир Александрович.

Луценко Т.М. провела презентацию на тему «Стратегия развития компаний OKOndt GROUP™ в контексте глобализации рынка», в которой была отражена международная деятельность компаний группы и меры по расширению сети контактов по всему миру. В частности, отмечено участие Ассоциации «ОКО» в ряде международных выставок – ECNDT 2018 (Швеция), InnoTrans 2018 (Германия), ASNT 2018 (Техас, США), Eurasia Rail 2019 (Турция) и др. Кроме того, специалисты по ультразвуковому и вихретоковому контролю регулярно проводят презентации и семинары в США, Бразилии, Мексике, Англии, Сингапуре, Тайланде, Италии, Польше, Турции, Индии, Бангладеш и др. странах для потенциальных клиентов и тренинги для тех, кто уже приобрел приборы нашего производства (проведены презентации и семинары по UDS2-77, ETS2-77 и др.). Среди клиентов по всему миру (а компании Ассоциации «ОКО» «покорили» качеством продукции уже 48 стран!) такие известные компании, как MAY, RODER PRAZISION (Германия), Королевские авиалинии Марокко, Regourd Aviation (Франция) и железные дороги стран СНГ и Балтии. Средства НК были также поставлены в Канаду, Швецию, Грузию и Индию.

Ведущий технолог по УЗК к.т.н. Галаненко Д.В. на пленарном заседании сделал обзор инновационных ультразвуковых дефектоскопов Sonocon V\BL и УЗ-каналов для автоматизации НК, выпускаемых на предприятиях Ассоциации.

Начальник отдела технологий НК УкрНИИ НК Мищенко В.П. рассказал об опыте разработки нового оборудования неразрушающего контроля для железнодорожной отрасли.

В рамках конференции была организована работа четырех секций: Железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство); Энергетика, Нефтегазовая и Химические отрасли; Авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов; Металлургия и машиностроение.

На заседании секции «Железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство)» (руководители Луценко Т.М. и Мищенко В.П.) были представлены следующие доклады: по неразрушающему контролю элементов колесных пар вагонов с учетом предлагаемых (но не утвержденных) изменений в ПР НК В.2 и соответствие их с РД по ремонту колесных пар; ультразвуковому контролю сварных соединений ответственных узлов и

деталей вагонов; применению метода акустической эмиссии при продлении срока службы тележек вагонов; вибродиагностическому методу контроля подшипников буксовых узлов колесных пар вагонов. Рассматривалось применение механизированных и ручных дефектоскопов, а также комплексный автоматизированный неразрушающий контроль колесных пар вагонов ультразвуковым, электромагнитно-акустическим и вихретоковым методами.

На секции «**Энергетика, Нефтегазовая и Химические отрасли**» (руководитель Галаненко Д.В.) были представлены следующие доклады: «Дифракционно-временной (TOFD) метод контроля сварных швов, преимущества над классическими методами. Система «TOFD-Man», а также «Применение дефектоскопа Sonoson B (BL) для ультразвукового контроля объектов в энергетике и нефтегазовой промышленности».

Плодотворно и интересно был проведен круглый стол по насущным вопросам неразрушающего контроля в указанных отраслях.

Работа секции «**Авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов**» (руководитель Верютин М.) была посвящена опыту автоматизации вихретокового контроля авиационных колес установкой SmartScan; перспективам оснащения авиационных предприятий современными мобильными диагностическими лабораториями; проведению ультразвукового контроля элементов конструкции самолетов Boeing 737 -300, -400, -500 в условиях эксплуатации; технологиям контроля авиационных двигателей с применением вихретокового метода контроля узлов самолетов современными дефектоскопами производства ООО «Промприлад» и повышению его производительности.

На секции «**Металлургия, машиностроение**» (руководитель Свистун А.В.) были представлены следующие доклады: «Ультразвуковой и вихретоковый контроль прокатных валков при производстве» на примере установки СНК В-35L; «Автоматизация магнитопорошкового контроля при выпуске продукции из производства». Также обсуждали доклад «Автоматизация ультразвукового контроля железнодорожных осей при выпуске из производства согласно международным стандартам (EN, ISO, ААМ)» установкой САУЗК, ОСЬ-4.

В рамках конференции был проведен традиционный семинар по обмену опытом между Органами по сертификации персонала (ОСП) в области НК, Учебными (УЦ) и Аттестационными (АЦНК) центрами (руководитель – заместитель директора УкрНИИ НК, к.т.н. Радько В.И.). В работе семинара приняли участие 50 специалистов из ОСП, УЦ, АЦНК

Презентация UDS2-77 для метрополитена в Южной Корее



Презентация UDS2-77 в Италии



Семинар по UDS2-77 и USR-01, Флорида, Майями, США



Тренинг по UDS2-77, Польша



Тренинг по ETS2-77, Турция



Тренинг по UDS2-77 и USR-01, Цинциннати, Огайо, США



Сотрудничаем с авиакомпаниями:



Поставка дефектоскопов на железные дороги:



и др. предприятий и организаций, заинтересованных в сертификации своих специалистов. На семинаре рассматривался весьма актуальный на сегодня вопрос применения для сертификации персонала ГОСТов по НК, действие которых прекращено в Украине с 01.01.2019 г. Этот вопрос актуален также, в первую очередь, для промышленности Укра-

ины, так как до сих пор в эксплуатации находится огромное количество машин, механизмов и оборудования, НК которых десятилетиями выполнялся в соответствии с требованиями упомянутых ГОСТов. При переходе к НК этих объектов в соответствии со стандартами серии ДСТУ EN ISO, исходя из отличий их требований от ГОСТ (в частности, к чувствительности контроля), в значительной мере теряется воспроизводимость результатов предыдущих контролей, т. е. достоверность и качество контроля. Вопрос вызвал оживленную дискуссию присутствующих на семинаре специалистов, были предложены легитимные варианты применения упомянутых ГОСТ по НК в дальнейшей работе систем сертификации персонала НК, организаций и предприятий. На семинаре также была рассмотрена политика Национального агентства по аккредитации Украины (НААУ), применяемая в настоящее время при аккредитации Органов оценки соответствия. Участники поделились опытом работы различных систем определения квалификации специалистов в добровольной сертификации в авиации, железнодорожном транспорте, судостроении, атомной энергетике. Всем участникам семинара были выданы свидетельства об участии в семинаре.

В ходе работы секций участники рассмотрели актуальные вопросы неразрушающего контроля, поделились проблемами и задачами, стоящими перед ними, а также обсудили способы их решения.

Кроме того, на конференции прошел семинар по обмену опытом между Органами по сертификации персонала в области неразрушающего контроля, Учебными и Аттестационными центрами.

День проведения конференции совпал с днем рождения представителя «Укрметртрестстандарт» Иващенко Андрея Павловича. Ему пожелали крепкого здоровья и дальнейших успехов.

Больше информации о конференции – на официальном сайте Ассоциации «ОКО»: www.ndt.com.ua

Организаторы **выставки-конференции «Не-разрушающий контроль-2019»** искренне благодарят всех, кто принял участие в мероприятии.

Убедившись в том, что такие события должны проходить регулярно, сообщаем всем коллегам, работающим в сфере неразрушающего контроля, что очередной выставке-конференции **«Не-разрушающий контроль-2020»** – быть! Ассоциация «ОКО» в мае 2020 г. с радостью встретит постоянных участников и надеется на участие новых, молодых инициативных специалистов в области неразрушающего контроля.

По материалам пост-релиза выставки-конференции «Не-разрушающий контроль-2019»

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ ФЕРОМАГНЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НА ЗМІНУ ПАРАМЕТРІВ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Є.П. Почапський, Б.П. Клим, Н.П. Мельник, П.П. Великий, П.М. Долішній

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

E-mail: melnyk_natalija@ukr.net

Досліджено вплив механічних властивостей конструкційних феромагнетних матеріалів та їх зварних з'єднань на зміну інформативних параметрів магнетопружної акустичної емісії. Виявлено, що наявність прикладеного зовнішнього навантаження, залишкових післязварювальних напружень та різної мікроструктури у зонах зварних з'єднань викликають зміну суми амплітуд, тривалості та форми обвідної акустичних сигналів. Підтверджено ефективність методу та перспективність його застосування для проведення діагностування елементів конструкцій тривалого експлуатування у різних середовищах. Бібліогр. 19, рис. 10.

Ключові слова: феромагнетний матеріал, доменна стінка, поле перемагнетнення, магнетопружна акустична емісія, інформаційні параметри сигналів, зварне з'єднання, зварний шов, зона термічного впливу, основний метал, залишкові напруження

На даний час в Україні важливою проблемою є діагностика стану виробів і елементів конструкцій, а також обладнання, що вичерпало свій експлуатаційний ресурс. Внаслідок тривалого експлуатування за жорстких умов, зокрема, високого рівня напружень, зміни температурного режиму, руйнівної дії навантажень та робочого середовища, значно погіршуються механічні властивості, якість та надійність елементів конструкцій. Для технічного діагностування стану матеріалів, з яких виготовляють ці вироби, варто застосовувати нові ефективні методи неруйнівного контролю.

Для контролювання стану феромагнетних елементів конструкцій та визначення їх довговічності перспективним є метод магнетопружної акустичної емісії (МАЕ) [1–3]. Він поєднує два фізичні процеси: перемагнетнення зовнішнім магнетним полем і реєстрацію пружних хвиль, які виникають під час стрибкоподібного переміщення не 180°-них доменних стінок в об'ємі зразка [1, 4]. Процес генерування сигналів МАЕ має певні особливості в околі окремих дефектів чи їх скупчень, де відбуваються суттєві зміни доменної структури матеріалу під впливом пластичних деформацій та дії напружень, що впливає на зміну параметрів МАЕ [1, 5, 6].

Сигнал МАЕ є багатопараметровим, зокрема, можна виділити такі параметри, які несуть інформацію про стан досліджуваного феромагнетного об'єкта: сума амплітуд та підсумковий рахунок сигналу (кількість імпульсів, що перевищують заданий поріг), максимальне значення амплітуди,

енергія сигналу, обвідна сигналу та положення її максимуму, спектр сигналу (ширина, медіана) [7].

Перевагами методу МАЕ за дослідження стану феромагнетних конструкцій, у порівнянні з широковідомим методом акустико-емісійного діагностування таких об'єктів, є відсутність потреби застосування додаткового навантаження, необхідності зупинки роботи чи зміни робочого режиму елемента, що підлягає контролю.

Метою роботи є оцінювання впливу механічних властивостей феромагнетних матеріалів та їх зварних з'єднань на зміну інформативних параметрів сигналів МАЕ за дії зовнішнього перемагнетчувального поля різної амплітуди.

За відсутності дії зовнішніх магнетних полів енергетично вигідним для феромагнетних матеріалів є формування певної конфігурації областей спонтанного намагнетнення – доменів, обмежених доменними стінками. Такі границі між магнетними доменами перебувають у стані спокою, а намагнетненість усього зразка рівна нулю. За дії прикладеного зовнішнього магнетного поля порушується рівновага, як наслідок, відбувається стрибкоподібний рух доменних стінок, що спричиняє появу сигналів МАЕ [8–10].

Прикладене силове навантаження до досліджуваного зразка зумовлює деформацію кристалічної ґратки та перебудову доменної структури. Чутливість магнетних властивостей матеріалу до зміни напружено-деформованого стану об'єкта дослідження проаналізовано у працях [11, 12].

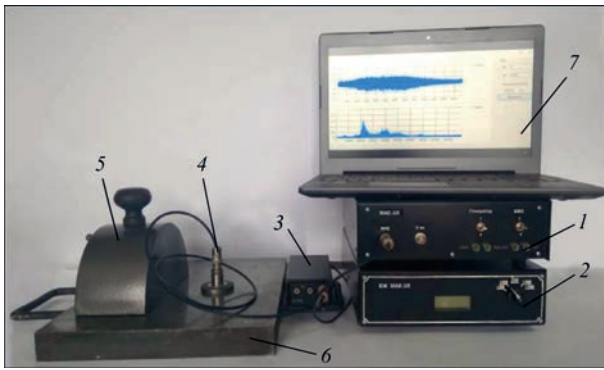


Рис. 1. Зовнішній вигляд апаратури для збудження, відбору, реєстрації та обробки сигналів МАЕ (опис див. у тексті)

Для оцінювання впливу прикладених механічних напружень на зміну параметрів сигналів МАЕ в експериментах використовували апаратуру для збудження, відбору, реєстрації та обробки сигналів МАЕ [7] (рис. 1). До її складу входять: магнетоакустична вимірювальна система МАЕ-3Л – 1 з автономним блоком живлення БЖ МАЕ-3Л – 2, попередній підсилювач – 3 з п'єзоелектричним перетворювачем – 4, накладний електромагнет (НЕМ) – 5, досліджувальний зразок – 6, персональний комп'ютер – 7.

Для випробувань виготовили експериментальні пластинчасті зразки з ніколу та трубною сталі 19Г. Перемагнення здійснювали сигналом синусоїдальної форми з частотою 9 Гц, використовуючи накладний П-подібний НЕМ.

До нікелового та сталевих зразків однакових розміру та форми прикладали зусилля одночасно розтягу (для ніколу напруження σ змінювали від 0 до 110 МПа, для сталі до 280 МПа), перемагчували їх зовнішнім полем та реєстрували сигнали

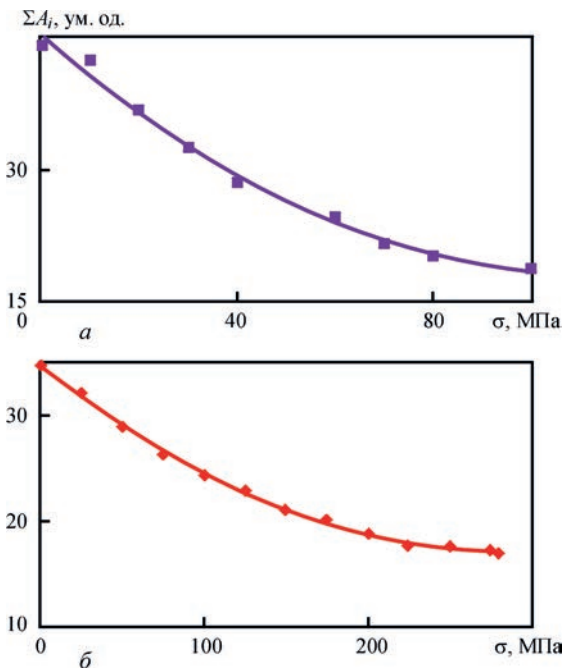


Рис. 2. Залежності суми амплітуд сигналів МАЕ від напружень, зумовлених зовнішнім навантаженням: а – нікелова пластинка ($B = 0,35$ Тл); б – пластинка зі сталі 19Г ($B = 1,28$ Тл)

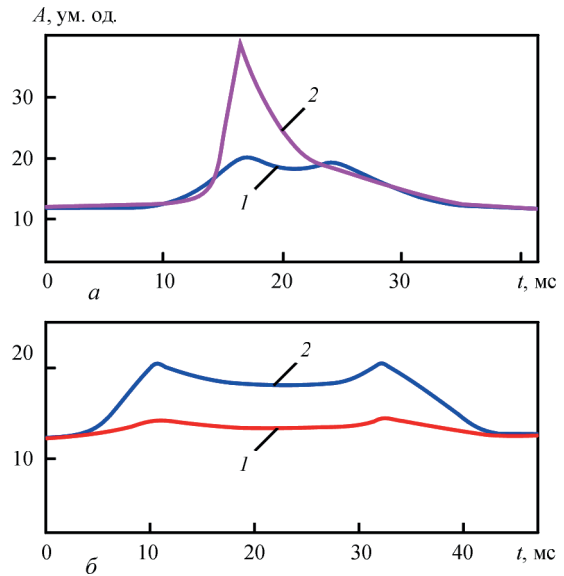


Рис. 3. Особливості форми обвідної МАЕ за зміни амплітуди індукції поля перемагнення B та $\sigma = 0$ МПа для: а – нікелового зразка ($I - 0,2$ Тл; $2 - 0,35$ Тл); б – сталевих зразка ($I - 1,08$ Тл; $2 - 1,8$)

МАЕ. За отриманими результатами побудовано залежності суми амплітуд сигналів МАЕ від амплітуди індукції перемагнечувального поля B (рис. 2). За сталої амплітуди індукції магнетного поля B та зі збільшенням прикладених напружень спостерігається зменшення суми амплітуд для обох зразків.

Досліджено особливості форми обвідної та залежності тривалості сигналів МАЕ від прикладеного зовнішнього навантаження та амплітуди індукції поля перемагнення (рис. 3–5). Зі збільшенням σ та B спостерігаємо зміну форми обвідної (для ніколу формується один гострий чіткий пік, для сталі – два піки) та значне зменшення амплітуди та тривалості сигналів МАЕ.

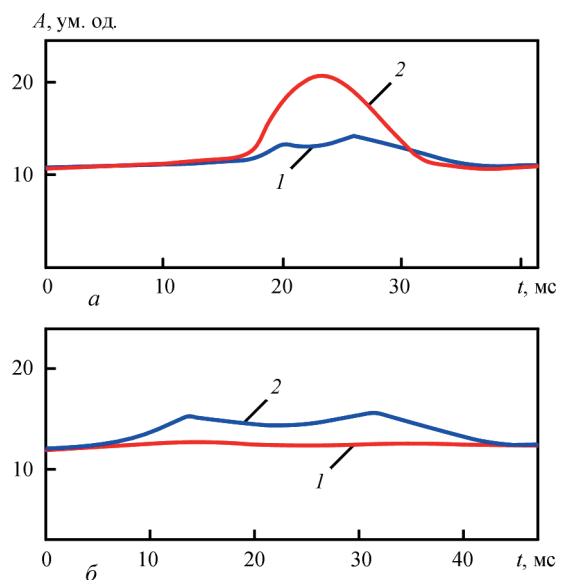


Рис. 4. Особливості форми обвідної МАЕ за зміни амплітуди індукції поля перемагнення B для: а – нікелового зразка ($\sigma = 110$ МПа; $I - 0,2$ Тл; $2 - 0,35$); б – сталевих зразка ($\sigma = 175$ МПа; $I - 1,08$ Тл; $2 - 1,8$)

Прикладені до досліджуваних феромагнетних зразків зовнішні механічні напруження спричиняють зміну магнетної структури. За дії напружень магнетопружна енергія є пропорційною до $\lambda \sigma \sin^2 \alpha$, де λ – стала магнетострикції; α – кут між напрямками вектора намагнетченості M та прикладених напружень до об'єкта контролю σ . Вплив цих напружень спричиняє поворот M паралельно за напрямком σ для мінімізації магнетопружної енергії. Це призводить до збільшення загальної площі 180°-них доменних стінок у об'ємі матеріалу, за рахунок зменшення площ не 180°-них, та зменшення амплітуди сигналів МАЕ [13]. Збільшення амплітуди сигналів МАЕ зі зростанням амплітуди індукції поля перемагнетчення можна пояснити підвищенням інтенсивності стрибків доменних стінок.

За реальних умов експлуатування феромагнетних конструкцій на підприємствах промислового сектора майже не можливе без впливів на матеріал

робочих середовищ, дії навантажень чи деформувань. Зміну магнетних властивостей матеріалу за різних режимів термічної обробки, зміни хімічного складу металу та підвищення його твердості досліджено у працях [11, 12], вплив структури матеріалу на зміну параметрів сигналів МАЕ у [14].

Кожен з перелічених вище чинників має місце за процесу утворення з'єднань методом зварювання. Основними проблемами після кристалізації зварних з'єднань (ЗЗ) залишаються наявність різної мікроструктури у всіх його зонах та внесення додаткових напружень внаслідок впливу високих температур.

Безпека експлуатації конструкцій із ЗЗ, зокрема, трубопроводів, забезпечується у першу чергу контролем їх роботоздатності і діагностичними дослідженнями. Особливу увагу варто приділити ЗЗ, зважаючи на їх особливості, такі як структурна неоднорідність за перерізом ЗЗ, накопичення неметалевих включень у металі шва, наявність залишкових післязварювальних напружень, утворення гарячих та холодних тріщин у процесі утворення ЗЗ [15]. У випадку довготривалого експлуатування ці чинники під впливом продукту, що транспортується, зміни робочих тисків та факторів зовнішнього середовища з часом можуть сприяти зародженню мікротріщин і, як наслідок, руйнуванню матеріалу.

Для оцінювання впливу механічних властивостей ЗЗ на зміну параметрів МАЕ ми досліджували мікроструктуру металу труби у діаметральному перерізі, використовуючи призматичні зразки розмірами 10×30×60 мм, вирізані з ділянки трубопроводів з поздовжнім швом, що виготовлені зі сталі 19Г нафтогону та 17Г1С газогону. Зразки полірували та травили 2%-м розчином азотної кислоти. Застосовували оптичний мікроскоп NU-2. Вплив неоднорідності структури різних зон ЗЗ трубопроводу на параметри сигналів МАЕ вивчали на зразках розміром 240×10×3 мм, вирізаних з трьох основних зон поздовжнього ЗЗ. Зразки перемагнетчували за допомогою НЕМ з 1260 витком з мідного дроту на кожній ніжці магнетопроводу. Амплітуду індукції

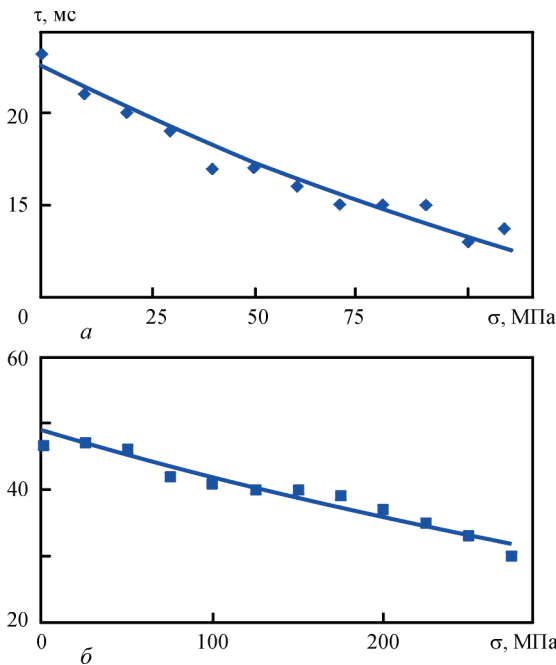


Рис. 5. Залежності тривалості сигналів МАЕ від величини прикладених напружень для: а – нікелового зразка ($B = 0,35$ Тл); б – сталевого зразка ($B = 1,8$ Тл)

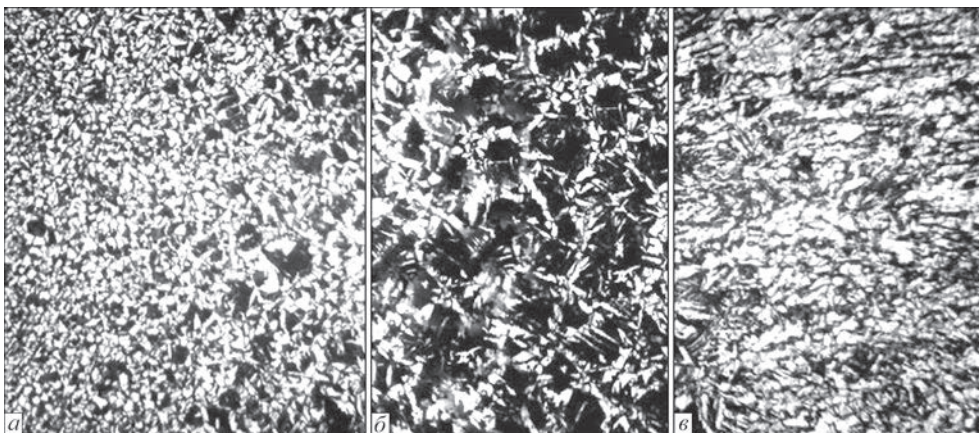


Рис. 6. Мікроструктура ($\times 125$) металу зварного з'єднання сталі 19Г нафтогону: а – основний метал; б – зона термічного впливу; в – зварний шов

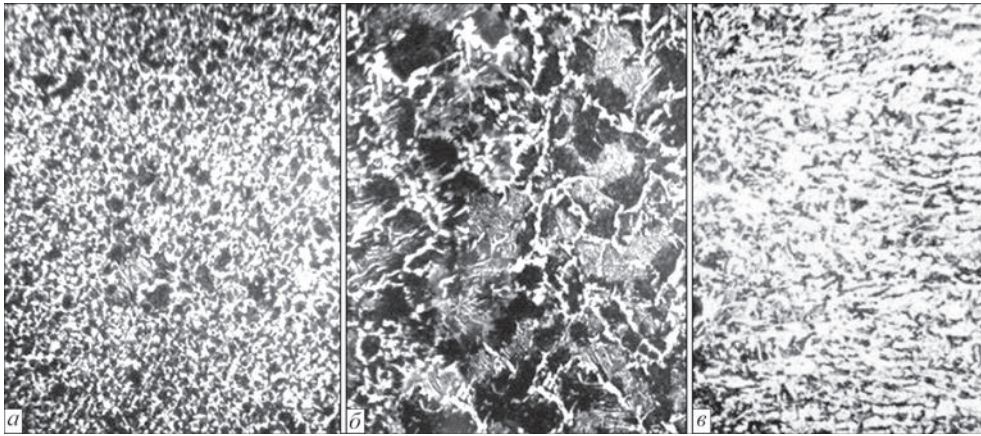


Рис. 7. Мікроструктура ($\times 125$) металу зварного з'єднання сталі 17Г1С газогону: *a* – основний метал; *b* – зона термічного впливу; *v* – зварний шов

магнетного поля в зразку міряли з допомогою ко-тушки (300 витків) за активного опору 14 Ω .

За металографічними дослідженнями було встановлено, що досліджувані матеріали належать до класу феритно-перлітних сталей (рис. 6, 7). Для структури зварних швів характерна більша дисперсність, ніж в основному металі, якому притаманна певна стрічковість структури внаслідок прокату. У зонах термічного впливу основною є ділянка перегріву з грубозернистою феритно-перлітною структурою та наявним відманштетовим феритом.

Автори праць [1, 4] аналізують вплив різних мікроструктурних факторів на доменну будову матеріалу, тому, зважаючи на структурну неоднорідність за поперечним перерізом 33, було проведено ряд експериментальних досліджень для встановлення залежностей між інформативними параметрами методу МАЕ та індукції магнетного поля B для зразків, що вирізані з різних зон трубного 33.

За результатами експерименту побудовано залежності (рис. 8). Помітно різницю між величиною значень суми амплітуд сигналів МАЕ для зразків, що вирізані з трьох основних зон 33.

Згідно з літературними даними [16–19] не 180°-ні доменні стінки, які є основним джерелом МАЕ, розташовуються по границях зерен. Отже, за відсутності інших чинників у структурі металу з вищим ступенем дисперсності, і, відповідно, більшою загальною довжиною границь, зростатиме кількість сигналів МАЕ та, як результат, їх сума амплітуд.

За сталої амплітуди індукції перемагнетчувального поля B найбільші значення суми амплітуд ΣA_i зареєстровано для зразків зі зварного шва (крива 1). У зразках із зони термічного впливу зафіксовано найнижчі значення ΣA_i (крива 2). Цей ефект пояснюється структурними перетвореннями у феромагнетик у впливом високих температур під час зварювання, які зумовлюють перебудову доменної структури матеріалу [4].

Дослідження впливу залишкових післязварювальних напружень на параметри сигналів МАЕ

проводили на фрагменті труби зі сталі 19Г діаметром 1020 мм, товщиною стінки 10 мм, після 48 років експлуатації з поздовжнім 33 (рис. 9). Для зняття напружень проводили відпружувальний відпал протягом 2 год за $T = 550$ °С, після чого охолоджували плиту разом з піччю. За результатами проведених експериментів встановили, що сума амплітуд сигналів МАЕ в 33 плити у вихідному стані є меншою, ніж у відпаленому (рис. 10).

Стрибки не 180°-них доменних стінок відбуваються внаслідок відриву їх від центрів закріплень за умови, коли значення зовнішніх прикладених полів перевищують значення критичного поля закріплення стінок, яке значно зростає за пластичних деформацій та стримує рух стінок. На основі

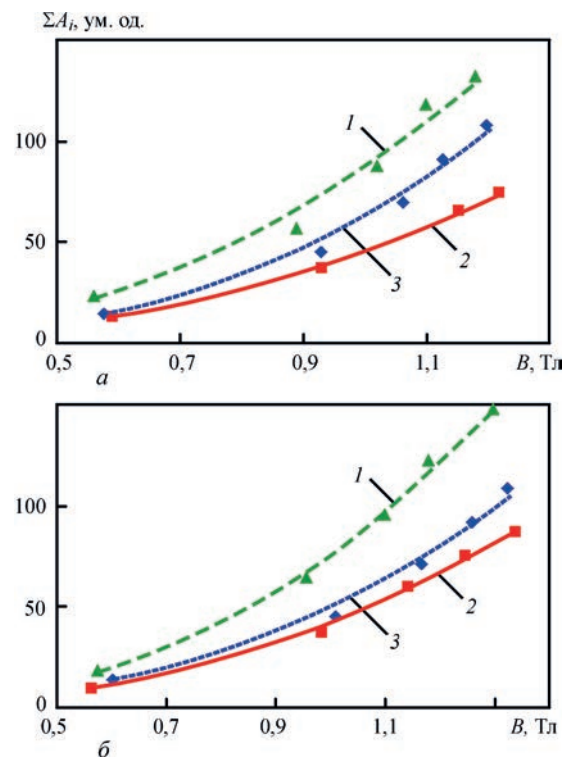


Рис. 8. Залежності суми амплітуд сигналів МАЕ від амплітуди індукції магнетного поля B для зразків із різних зон трубного зварного з'єднання: *a* – газогону; *b* – нафтогону (1 – метал шва; 2 – зона термічного впливу; 3 – основний метал)

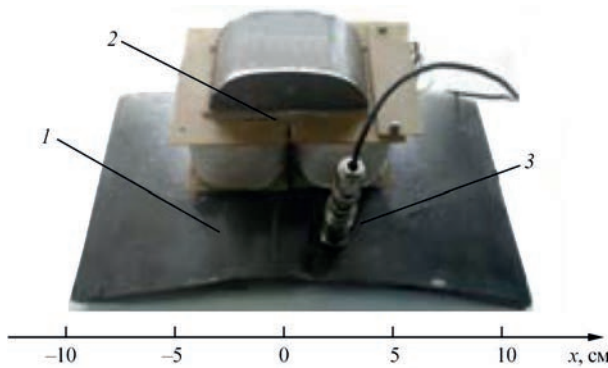


Рис. 9. Розташування НЕМ на фрагменті труби з повздовжнім зварним з'єднанням: 1 – фрагмент труби; 2 – НЕМ; 3 – перетворювач акустичної емісії

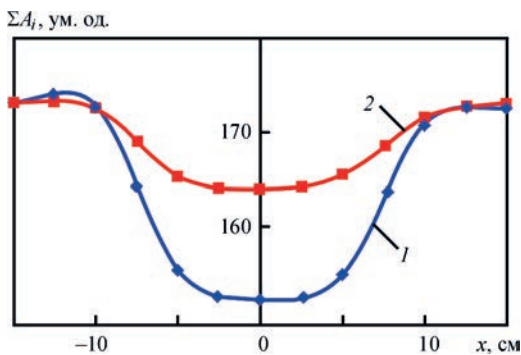


Рис. 10. Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від розташування НЕМ на фрагменті труби: 1 – у вихідному стані; 2 – після проведення відпалу

цього відзначимо, що залишкові напруження після зварювання понижують інтенсивність стрибків на 180°-них доменних стінках, що пояснюється створенням додаткових центрів закріплень.

Висновки

Досліджено вплив зовнішніх силових навантажень, прикладених до пластинчастих зразків, що виготовлені з ніколу та сталі 19Г, на зміну інформативних параметрів сигналів МАЕ. Встановлено, що зі збільшенням прикладених зовнішніх напружень сума амплітуд сигналів зменшується за сталого значення амплітуди індукції перемагнетичувального поля; спостерігається також зміна форми обвідної та скорочення тривалості сигналів МАЕ.

Показано, що розмір зерна структури зон основного металу, термічного впливу та зварного шва з'єднань, утворених методом зварювання, впливає на параметри сигналів МАЕ: вища дисперсність підвищує інтенсивність та суму амплітуд.

На фрагменті труби зі сталі 19Г з повздовжнім зварним з'єднанням виявлено вплив залишкових післязварювальних напружень на зміну суми амплітуд сигналів МАЕ.

Узагальнення наведених результатів дозволяє зробити висновок, що метод МАЕ є достатньо чутливим за дослідження напруженого стану ферромагнетних матеріалів, зварних елементів конструкцій після тривалого періоду експлуатування

у різних середовищах. Це свідчить про можливість застосування даного методу для проведення неруйнівного контролю таких матеріалів.

Роботу виконано за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230).

Список літератури

1. Ono K., Shibata M. (1981) Magneto mechanical acoustic emission – a new method for non-destructive stress measurement. *J. NDT International*, October, 227–234.
2. Скальський В.Р., Почапський Є.П., Клим Б.П., Рудак М.О. (2016) Застосування методу магнетопружної акустичної емісії для контролю напруженого стану ферромагнетних елементів конструкцій. *Технологические системы*, 2, 67–70.
3. Pochaps'kyi E.P., Klym B.P., Rudak M.O. et al. (2017) Application of the Magnetoelastic Acoustic Emission for the Corrosion Investigations of Steels. *Materials Science*, 52, 5, 742–742.
4. Назарчук З.Т., Андрейків О.Є., Скальський В.Р. (2013) Оцінювання водневої деградації ферромагнетиків у магнетному полі. Київ, Наукова думка.
5. Skalsky V., Hirnyj S., Pochapskyu Ye. et al. (2011) The effect of deformation on the parameters of magnetoacoustic signals. *Вісник ТНТУ. Спецвипуск. Ч.1*, 155–161.
6. Pochapskyu Ye., Nazarchuk Z., Skalsky V., Himyj S. (2012) Application of magnetoacoustic emission for detection of hydrogen electrolytically absorbed by steel. *Proc. 19th Europ. Confer. on Fracture «Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety»*, Kazan, Russia. 26–31 August, 2012. ID 405.
7. Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Почапський Є.П. (2014) Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. Київ, Наукова думка.
8. Тикадзуми С. (1987) *Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества*. Пер. с японского. Москва, Мир, сс. 179–185.
9. Durin G., Zapperi S. (2006) The Barkhausen effect. *The Science of Hysteresis*, II, 181–267.
10. Alessandro B., Beatrice, C., Bertotti, G., Montorsi A. (1990) Domain wall dynamics and Barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. I. Theory. *J. Appl. Phys.*, 68(11), 2901–2908.
11. Мельгуй М.А. (1980) *Магнитный контроль механических свойств сталей*. Минск, Наука и техника.
12. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. (1993) *Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля*. Москва, Наука.
13. Ng D.H.L., Jakubovics J.P., Scruby C.B., Briggs G.A.D. (1992) Effect of stress on magneto-acoustic emission from mild steel and nickel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 104–107, 355–356.
14. Скальський В.Р., Михальчук В.Б., Долішній П.М., Семенівський Р.І. (2008) Вплив структури матеріалу на зміну амплітуд магнетопружної акустичної емісії. *Зб. наук. праць ФМІ НАН України «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів»*. Львів, Вип. 13, сс. 80–83.
15. Кречковська Г.В., Яновський С.Р., Студент О.З., Никифорчин Г.М. (2015) Фрактографічні ознаки експлуатаційної деградації зварних з'єднань магістральних нафтогонів. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 51, 2, 21–27.
16. Guyot M., Cagan V. (1993) The magneto-acoustic emission (invited). *J. Appl. Phys.*, 73(10), 5348–5353.
17. Ng D.H.L., Lo C.C.H., Jakubovics J.P. (1994) The effects of demagnetizing and stray fields on magnetoacoustic emission. *Ibid*, 75(10), 7009–7011.
18. Ng D.H.L., Yu C.C., Qin C-D. et al. (1996) The dependence of magnetoacoustic emission on magnetizing frequency in nickel and mild steel. *Ibid*, 79(8), 6057–6059.
19. Почапський Є.П., Мельник Н.П. (2015) Оцінювання переміщень доменної стінки у ферромагнетних матеріалах

за дії зовнішнього магнетного поля. *Вісник ТНТУ. Тернопіль*, 3(79), 102–109.

References

1. Ono, K., Shibata, M. (1981) Magneto mechanical acoustic emission – a new method for non-destructive stress measurement. *J. NDT International*, October, 227–234.
2. Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P., Klym, B.P., Rudak, M.O. (2016) Application of the method of magnetoelastic-acoustic emission for control of the stressed state of ferromagnetic structural elements. *Tekhnolog. Sistemy*, 2, 67–70 [in Ukrainian].
3. Pochaps'kyi, E.P., Klym, B.P., Rudak, M.O. et al. (2017) Application of the magnetoelastic acoustic emission for the corrosion investigations of steels. *Materials Sci.*, 52(5), 742–742.
4. Nazarchuk, Z.T., Andrejkiv, O.E., Skalskyi, V.R. (2013) *Evaluation of hydrogen degradation of ferromagnetic in magnetic field*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
5. Skalsky, V., Hirnyi, S., Pochapsky, Ye. et al. (2011) The effect of deformation on the parameters of magnetoacoustic signals. *Visnyk TNTU, Special Issue, Pt 1*, 155–161.
6. Pochapskyu, Ye., Nazarchuk, Z., Skalsky, V., Hirnyi, S. (2012) *Application of magnetoacoustic emission for detection of hydrogen electrolytically absorbed by steel*. In: *Proc. of 19th Europ. Confer. on Fracture «Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety»* (Kazan, Russia. 26–31 August, 2012). ID 405.
7. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R., Pochapskyi, Ye.P. (2014) *Technology of sampling and processing of low-energy diagnostic signals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
8. Tikadzumi, S. (1987) *Physics of ferromagnetism. Magnetic properties of materials*. Moscow, Mir [in Russian].
9. Durin, G., Zapperi, S. (2006) The Barkhausen effect. *The Science of Hysteresis*, II, 181–267.
10. Alessandro, B., Beatrice, C., Bertotti, G., Montorsi, A. (1990) Domain wall dynamics and Barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. *I. Theory. J. Appl. Phys.*, 68(11), 2901–2908.
11. Melguy, M.A. (1980) Magnetic control of mechanical properties of steels. Minsk, Nauka i Tekhnika [in Russian].
12. Mikheev, M.N., Gorkunov, E.S. (1993) *Magnetic methods of structural analysis and nondestructive testing*. Moscow, Nauka [in Russian].
13. Ng, D.H.L., Jakubovics, J.P., Scruby, C.B., Briggs, G.A.D. (1992) Effect of stress on magneto-acoustic emission from mild steel and nickel. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, 104–107, 355–356.
14. Skalskyi, V.R., Mykhalchuk, V.B., Dolishnii, P.M., Semegenyivskyi, R.I. (2008) Influence of material structure on change of amplitudes of magnetoelastic-acoustic emission. In: *Physical methods and means of control of media, materials and products. Transact. of PMI, Lviv*, Issue 13, 80–83 [in Ukrainian].
15. Krechkovska, G.V., Yanovskiy, S.R., Student, O.Z., Nykyforchyn, G.M. (2015) Fractographic indications of service degradation of welded joints in main oil pipelines. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 51(2), 21–27.
16. Guyot, M., Cagan, V. (1993) The magneto-acoustic emission (invited). *J. Appl. Phys.*, 73(10), 5348–5353.
17. Ng, D.H.L., Lo, C.C.H., Jakubovics, J.P. (1994) The effects of demagnetizing and stray fields on magnetoacoustic emission. *Ibid.*, 75(10), 7009–7011.
18. Ng, D.H.L., Yu, C.C., Qin, C-D. et al. (1996) The dependence of magnetoacoustic emission on magnetizing frequency in nickel and mild steel. *Ibid.*, 79(8), 6057–6059.
19. Pochapskyi, Ye.P., Melnyk, N.P. (2015) Evaluation of displacements of domain wall in ferromagnetic materials due to action of external magnetic field. *Ternopil, Visnyk TNTU*, 3(79), 102–109 [in Ukrainian].

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОУПРУГОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Е.П. Почапский, Б.П. Клим, Н.П. Мельник, П.П. Великий, П.Н. Долишний

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5

E-mail: melnyk_natalija@ukr.net

Исследовано влияние механических свойств конструкционных ферромагнитных материалов и их сварных соединений на смену информативных параметров магнитоупругой акустической эмиссии. Выявлено, что наличие приложенной внешней нагрузки, остаточных послесварочных напряжений и различной микроструктуры в зонах сварных соединений вызывают изменение суммы амплитуд, продолжительности и формы огибающей акустических сигналов. Подтверждена эффективность метода и перспективность его применения для проведения диагностики элементов конструкций длительной эксплуатации в различных средах. Библиогр. 19, рис. 10.

Ключевые слова: ферромагнитный материал, доменная стенка, поле перемагничивания, магнитоупругая акустическая эмиссия, информационные параметры сигналов, сварное соединение, сварной шов, зона термического влияния, основной металл, остаточные напряжения

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL FERROMAGNETIC MATERIALS AND THEIR WELDED JOINTS ON THE CHANGE OF PARAMETERS OF MAGNETOELASTIC ACOUSTIC EMISSION

Ye.P. Pochapskyi, B.P. Klym, N.P. Melnyk, P.P. Velykyi, P.M. Dolishnii

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: melnyk_natalija@ukr.net

Influence of mechanical properties of structural ferromagnetic materials and their welded joints on the change of informative parameters of magnetoelastic acoustic emission was studied. It was found that presence of applied external loading, residual postweld stresses and different microstructure in welded joint zones causes a change of the sum of amplitudes, duration and form of acoustic signal envelope. Effectiveness of the method and prospects for its application for conducting diagnostics of elements of structures in long-term service in different environments were confirmed. 19 Ref., 10 Fig.

Keywords: ferromagnetic materials, domain wall, remagnetization field, magnetoelastic acoustic emission, signal information parameters, welded joint, weld, heat-affected zone, base metal, residual stresses

Надійшла до редакції 27.02.2019

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЛУНА-ІМПУЛЬСНОЇ ТОВЩИНОМЕТРІЇ ЗА ЇХ ЗНАЧНОГО ЗАГАСАННЯ

Е.Д. Близнюк¹, Ю.В. Куц², О.В. Монченко¹, Ю.А. Олійник²

¹Національний авіаційний університет. 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

E-mail: nau_409@ukr.net, monchenko_olena@ukr.net

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: y.kuts@ukr.net

Розвинуто метод статистичної фазової ультразвукової товщинометрії виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань на основі аналізу фазової характеристики сигналів. Наведено методику та результати моделювання процесу опрацювання сигналів в середовищі Matlab. Бібліогр. 10, рис. 3.

Ключові слова: ультразвуковий неруйнівний контроль, достовірність, статистична фазометрія

Однією з необхідних умов безаварійної експлуатації технічних систем є їх діагностика та контроль на різних етапах життєвого циклу. Ефективні технічні рішення таких завдань отримують на основі використання методів та засобів ультразвукового неруйнівного контролю (УЗНК) [1–3].

Значне коло завдань УЗНК пов'язане з визначенням геометричних розмірів об'єктів контролю (ОК). Стоншення елементів конструкцій і механізмів внаслідок зношування та дії різних видів корозії було і лишається однією з найнебезпечніших загроз, що приводить до втрати ними несучої спроможності, погіршення експлуатаційних характеристик та руйнування. Широко розповсюдженим методом ультразвукової товщинометрії (УЗТ) є луна-імпульсний метод, який ґрунтується на визначенні часу поширення ультразвукових коливань в ОК. На початкових етапах розвитку цей метод УЗТ застосовувався для контролю виробів з металів та сплавів, що визначило основні ідеї і напрями розроблення апаратури та удосконалення методів оцінювання параметрів та характеристик сигналів УЗТ.

Останнім часом в промисловості і на транспорті значного поширення набувають нові конструкційні матеріали. Зокрема до таких матеріалів належать композиційні матеріали, які порівняно з металами характеризуються більшим загасанням ультразвукових коливань та розкидом фізико-механічних характеристик. Контроль товщини виробів з таких матеріалів відомими методами і засобами ускладнений внаслідок суттєвого зменшення відношення сигнал/шум (с/ш).

Підвищення достовірності виявлення сигналів УЗТ на фоні значних шумів в ряді завдань вирішується, до прикладу, збільшенням потужності зондуючих сигналів або збільшенням кількості вимірювальної інформації за рахунок підвищен-

ня частоти дискретизації сигналу в аналого-цифрових перетворювачах. Практична реалізація таких методів має певні обмеження і не завжди є прийнятною.

В більшості луна-імпульсних товщиномірів методологія опрацювання сигналів ґрунтується на використанні їх амплітудних характеристик [4–7]. Амплітудні методи виявлення сигналів мають просту апаратну реалізацію, проте отримуваний результат залежить не тільки від форми, але й від величини сигналу.

Фазовий зсув є неенергетичним параметром сигналу і має фіксований максимальний розмір 2π не залежний від амплітуди сигналу. Не дивлячись на ці та інші переваги інформація, що міститься в фазових характеристиках сигналів (ФХС) не береться до уваги у засобах УЗТ. Це частково пояснюється значною обчислювальною складністю фазових методів і необхідністю використання високопродуктивних засобів оброблення сигналів. В останні роки значні успіхи в розвитку інформаційно-вимірювальних технологій, цифрової та мікропроцесорної техніки створили умови для широкого застосування таких методів в засобах УЗНК. Таким чином завдання удосконалення луна-імпульсного методу УЗТ на основі більш повного використання особливостей фазової структури інформаційних сигналів є актуальним і економічно виправданим.

В роботах [8, 9] запропоновано метод УЗТ, що ґрунтується на положеннях статистичної фазометрії. В статті розглянуто подальше удосконалення цього методу стосовно підвищення вірогідності виявлення сигналів УЗТ в умовах їх значного зашумлення.

Постановка задачі. Визначається товщина ОК з матеріалу зі значним загасанням ультразвуковим

луна-імпульсним методом. Введення/виведення ультразвукового сигналу в/з ОК відбувається за допомогою сумішеного п'єзоелектричного перетворювача. Зондування ОК здійснюється радіоімпульсним сигналом виду

$$u_3(t) = \begin{cases} U \sin(2\pi ft + \theta), & t \in [0, T_3], \\ 0, & t \notin [0, T_3] \end{cases} \quad (1)$$

з відомою амплітудою U , частотою f і тривалістю T_3 , що не перевищує декількох періодів сигналу-носія $T = f^{-1}$, та початковою фазою $\theta \in [0, 2\pi]$.

Досліджуваний сигнал $u(t)$ являє собою адитивну суміш донних сигналів УЗТ (періодичну з періодом повторення T_{Π} послідовності відбитих від протилежної сторони ОК донних сигналів) і реалізації гауссового шуму $\xi(t)$ виду

$$u(t) = \sum_{i=1}^k K_i u_3(t - \tau_3 - (i-1)T_{\Pi}) + \xi(t), \quad (2)$$

де K_i – коефіцієнти електроакустичного тракту для i -го донного сигналу, $i = 1, k$; τ_3 – затримка на поширення акустичного сигналу в ОК у прямому і зворотному напрямках; k – кількість спостережуваних донних сигналів; $\xi(t)$ – реалізація гауссового шуму з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ^2 . Аналіз сигналу (2) виконується на часовому інтервалі $t \in [0, T_a]$. Відношення с/ш оцінюється як с/ш $= K_i U / \sigma$ і може зменшуватись до одиниці і менше.

Необхідно удосконалити метод луна-імпульсної УЗТ, який ґрунтується на статистичному опрацюванні ФХС УЗТ, для підвищення достовірності виявлення донних сигналів у суміші (2).

Розв'язання поставленого завдання. Відомий метод УЗТ [9] ґрунтується на виявленні донних імпульсів за поточним значенням r -статистики, яка визначається з фазових характеристик сигналу (2). r -статистика [8, 10], або вибіркова результуюча довжина вектора, належить до числа кругових статистик, які визначаються для розподілених на колі випадкових кутів або фазових зсувів сигналів. Удосконалення цього способу виконується за рахунок використання додаткової вагової функції для зваженого оцінювання r -статистики. Ідея такого методу полягає у наступному.

Для досліджуваного сигналу (2) за допомогою його перетворення Гільберта (ПГ) визначається фазова характеристика [8] як функція часу, обчислюється різниця цієї характеристики та фази гар-

монічного коливання з частотою f сигналу-носія, розраховуються значення r -статистики, отримані під час ковзного віконного опрацювання цієї різниці фаз вікном $W1$, визначається зважена статистика $r_{зв}$, як результат перемноження r -статистики на поточні значення відгуку оператора вибіркового середнього квадратичного відхилення, отримані під час ковзного віконного опрацювання r -статистики іншим вікном $W2$. За статистикою $r_{зв}$ визначає положення в часі донних імпульсів.

Структурно-логічну схему опрацювання сигналів УЗТ та формування рішення про наявність донних сигналів представлено на рис. 1.

Для елементів схеми використано наступні позначення: ПГ – перетворювач Гільберта; ФХС – модуль визначення ФХС; Σ – суматор; ВО1, ВО2 – модулі віконного опрацювання сигналу; r , $r_{зв}$ – модулі визначення відповідно r -статистики та $r_{зв}$ -статистики; СКВ – модуль, що реалізує оператор вибіркового середнього квадратичного відхилення; ПП – модуль порівняння з порогом Π , прийняття рішення про наявність донного сигналу та визначення його положення в часі. Областю значень r -статистики є інтервал $[0, 1]$, тому рішення про наявність донного сигналу формується на основі порівняння поточних значень $r[j]$ з порогом $0 < \Pi < 1$.

Реалізація процесу цифрового опрацювання сигналів УЗТ. Після аналого-цифрового перетворення сигналу (2), яке виконується з періодом дискретизації $T_d \ll f^{-1}$, останній представляється цифровою послідовністю $u[j]$, $j = 1, N$, де $N = T_a / T_d$ (з точністю до цілого числа). До $u[j]$ застосовується дискретне ПГ [8], яке в модулі ПГ (рис. 1) реалізується оператором \mathbf{H}_d і отримується гільберт-образ вибірки

$$\hat{u}[j] = \mathbf{H}_d(u[j]), \quad j = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Дискретна фазова характеристика сигналу на всьому інтервалі його аналізу визначається в модулі «ФХС» за алгоритмом [3]:

$$\Phi[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \mathbf{L}(\hat{u}[j], u[j]), \quad (4)$$

де \mathbf{L} – оператор розгортання фазової характеристики сигналу за межі інтервалу $[-0,5\pi; 0,5\pi]$, тобто за межі однозначного визначення функції \arctg .

Значення r -статистики отримують в модулі « r » з послідовності $\phi[j] = \Phi[j] - 2\pi f T_d j$, $j = 1, N$, яку обчислюють в модулі « Σ ». В останньому виразі $2\pi f T_d j$ – це поточні значення дискретної ФХС гармонічного сигналу з частотою f . Поточні значення r -статистики визначаються у ковзному режимі, який забезпечується модулем «ВО1» шляхом відбору певної підмножини значень послідовності $\phi[j]$. Якщо вікно $W1$ має апертуру $(2M+1)$, то

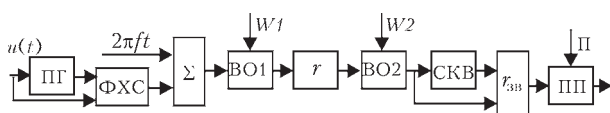


Рис. 1. Структурно-логічна схема опрацювання сигналів УЗТ за запропонованим методом (позначення див. у тексті)

кожне j -те значення цієї статистики обчислюється за формулою:

$$r[j] = \frac{1}{2M+1} \sqrt{\left(\sum_{k=j-M}^{j+M} \cos \varphi[k] \right)^2 + \left(\sum_{k=j-M}^{j+M} \sin \varphi[k] \right)^2},$$

$$j = \overline{M, N-M}. \quad (5)$$

Після отримання r -статистики в модулі «СКВ» визначаються вагові коефіцієнти $\sigma_r[j]$, як відгуки оператора вибіркового середнього квадратичного відхилення на підмножину значень $r[j]$. Ця процедура реалізується в модулі «ВО2» під час опрацювання послідовності $r[j]$ ковзним вікном з апертурою $(2M_\sigma + 1)$:

$$\sigma_r[j] = \sqrt{\frac{1}{2M_\sigma} \sum_{k=j-M_\sigma}^{j+M_\sigma} (r[k] - \bar{r}_j)^2},$$

$$j = \overline{M_\sigma, N-M_\sigma}, \quad (6)$$

де \bar{r}_j – середнє значення відібраних вікном $W2$ елементів підмножини $r[j]$.

Поточні значення зваженої статистики r_{3B} визначаються у відповідному модулі « r_{3B} » за формулою

$$r_{3B}[j] = r[j] \sigma_r[j]. \quad (7)$$

Рішення про наявність/відсутність донного сигналу приймається в модулі «ПП» за результатами порівняння значень $r_{3B}[j]$ з пороговим рівнем Π , який визначається на етапі тестування.

Процедура (7) вагового опрацювання r -статистики призводить до збільшення відношення с/ш і, як наслідок, до підвищення достовірності виявлення сигналів УЗТ, що підтверджується результатами модельних досліджень.

Моделювання. Дослідження виконувались на моделі сигналу (2) з наступними параметрами: $f = 5$ кГц; $U = 1$ В; $\sigma = 0,5$ В; $T_3 = 0,6$ мс; $T_a = 1,6$ с;

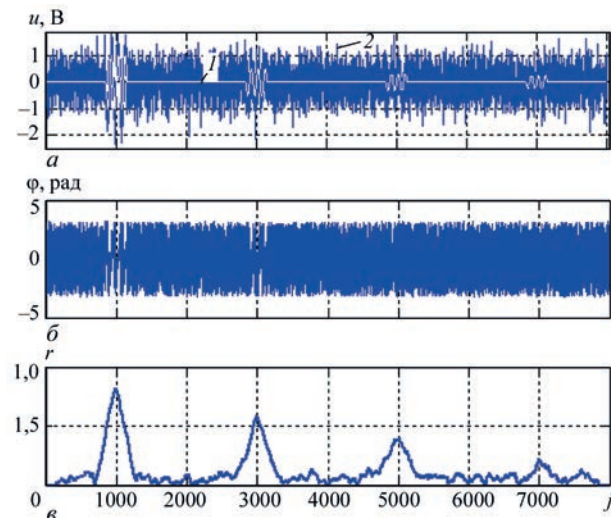


Рис. 2. Вибірки досліджуваного сигналу (а), послідовності $\varphi[j]$ (б) та r -статистики (в)

$T_\Pi = 0,4$ с; $\tau_3 = 0,2$ с; $k = 4$; $K = \{1, 1/2, 1/3, 1/4\}$. Отримана вибірка сигналу обсягу $N = 8000$ зображена на рис. 2, а.

З урахуванням заданих параметрів відношення с/ш для донних сигналів становить: $\{2, 1, 2/3, 0,5\}$.

За результатом реалізації поданого вище процесу цифрового опрацювання вибірки $u[j]$, $j = 1, 8000$, отримано послідовності $\varphi[j]$ та $r[j]$, які зображені відповідно на рис. 2, б, в. В обчисленнях використане вікно $W1$ має апертуру $M = 300$, що відповідає в часі тривалості донного сигналу.

Областю значень r -статистики є інтервал $[0, 1]$. Тому рішення про наявність донного сигналу формується на основі порівняння поточних значень $r[j]$ з певним порогом $\Pi < 1$. В структурі рис. 1 ця операція виконується в модулі ПП.

Характерною особливістю r -статистики є її інваріантність до початкової фази θ моделі (1). Крім того, з аналізу рис. 2, в можна відзначити інші її особливості, важливі для УЗТ: максимумами $r[j]$ в часі співпадають з положенням донних сигналів; амплітудні значення $r[j]$ зменшуються зі зменшенням відношення с/ш. Остання закономірність призводить до зменшення достовірності виявлення донних сигналів УЗТ.

Підвищення відношення с/ш і, відповідно, підвищення вірогідності виявлення донних сигналів досягається за рахунок додаткового вагового опрацювання послідовності $r[j]$, тобто без збільшення потужності зондуючого сигналу чи збільшення кількості вимірювальної інформації. На рис. 3 наведено графіки раніше отриманої послідовності $r[j]$ та нової послідовності $r_{3B}[j]$. Остання обчислена за модифікованою формулою (7)

$$r_{3B}[j] = r[j] \sigma_r[j] (j/400+4). \quad (8)$$

Введений у вираз (8) емпіричний коефіцієнт $(j/400+4)$ не має принципового значення для підвищення відношення с/ш, але дозволяє «вирівняти» амплітуди донних сигналів у двох послідовностях і забезпечити більш наочний і об'єктивний їх співставний аналіз.

Наведені на рис. 3 графіки свідчать про певне зменшення шумової складової послідовності $r_{3B}[j]$ відносно $r[j]$. Беручи до уваги той факт, що r -статистика є неенергетичним параметром, а рішення про наявність донних сигналів приймається за результатами аналізу її поточних значень, доцільно

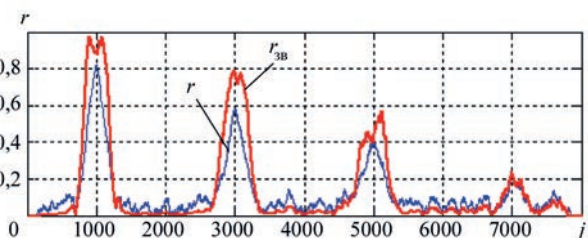


Рис. 3. Графічне зображення послідовностей $r[j]$ та $r_{3B}[j]$

оцінювати відношення с/ш в послідовностях $r_{3B}[j]$ та $r[j]$ відношенням їх максимальних значень на ділянках донного сигналу і шуму, тобто відношеннями $r(c)/r(ш)$ та $r_{3B}(c)/r_{3B}(ш)$. За такою методикою для четвертого донного сигналу маємо

$$r(c)/r(ш) \cong 0,22/0,114 \cong 2,$$

натомість для послідовності $r_{3B}[j]$ маємо

$$r_{3B}(c)/r_{3B}(ш) \cong 0,24/0,06 \cong 4,$$

тобто покращення відношення с/ш приблизно у два рази. Цей висновок був в цілому підтверджений у серії зі 100 модельних експериментів.

Таким чином, додаткове вагове опрацювання r -статистики дозволяє підвищити відношення с/ш для сигналів УЗТ, що сприяє підвищенню достовірності їх виявлення в завданнях контролю товщини виробів з матеріалів зі значним загасанням ультразвукових коливань.

Крім того, підвищення відношення с/ш дозволяє покращити точність вимірювання товщини виробів ультразвуковим луна-імпульсним методом за рахунок виявлення більшої кількості донних сигналів і можливості статистичного усереднення більших обсягів експериментальних даних.

Подальше удосконалення розглянутого методу УЗТ потребує більш детального аналізу впливу розміру та форми апертур вікон на відношення с/ш для r -статистики.

Висновки

Удосконалено та досліджено метод статистичного опрацювання результатів вимірювання товщини виробів для ультразвукових луна-імпульсних товщиномірів. Метод ґрунтується на аналізі поточних значень зваженої r -статистики, яка визначається за фазовими характеристиками сигналів УЗТ.

Дослідження проводились на моделі сигналу, що являє собою адитивну суміш послідовності загасаючих донних сигналів УЗТ і реалізації гауссового шуму. Результатами моделювання доведено, що додаткове вагове опрацювання r -статистики дозволяє підвищити відношення с/ш приблизно у два рази без збільшення потужності зондуючих сигналів чи збільшення кількості вимірювальної інформації.

Експериментальними дослідженнями доведено, що застосування додаткового вагового опрацювання r -статистики дозволяє підвищити вірогідність виявлення сигналів УЗТ на приблизно 10 % і дає змогу виявляти сигнали УЗТ за відношення с/ш одиниця і менше.

Подальше удосконалення дослідження розглянутого способу УЗТ на основі використання методу статистичної фазометрії потребує

більш детального аналізу впливу розміру та форми апертур вікон на відношення с/ш для r -статистики.

Отримані результати можуть бути використані для розроблення нових ультразвукових луна-імпульсних товщиномірів, призначених для роботи з матеріалами зі значним загасанням ультразвукових коливань. Розроблене програмне забезпечення може бути використано як автономно, так і у складі програмно-апаратних засобів УЗТ.

Список літератури

1. Крауткремер Й., Крауткремер Г. (1991) *Ультразвуковой контроль материалов*: справоч. изд., пер.с нем. Москва, Металлургия.
2. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. (2004) *Неразрушающий контроль*: Справочник: В 7 т. Ключев В.В. (ред.). Т.3: Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение.
3. Цапенко В.К., Куц Ю.В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*: Підручник. Київ, НТУУ «КПІ».
4. Чуприн В.А., Бизюлев А.Н., Коновалов А.А. (2008) Особенности ультразвуковой толщинометрии промышленных объектов и изделий. *В мире неразрушающего контроля*, 2(40), 12–14.
5. Королев М.В. (1980) *Эхо-импульсные толщинометры*. Москва, Машиностроение.
6. Кретов Е.Ф. (2008) Ультразвуковая толщинометрия в машиностроении. *В мире неразрушающего контроля*, 2, 26–28.
7. Семеренко А.В. (2008) Эхо-метод ультразвуковой толщинометрии. *Там же*, 2(40), 6–10.
8. Куц Ю.В., Щербак Л.М. (2009) *Статистична фазометрія*. Тернопіль, ТДТУім. Івана Пулюя.
9. Куц Ю.В., Єременко В.С., Монченко О.В., Лапіга І.М. (2006) *Спосіб ультразвукового вимірювання товщини виробів*. Україна Пат. на корисну модель № 35057, МПК G01B 17/02.
10. Fisher N.I. (2000) *Statistical Analysis of Circular Data*. Cambridge University Press.

References

1. Krautkramer, J., Krautkramer, G. (1991) *Ultrasonic control of materials*: Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) *Nondestructive testing*: Refer. book. In: 7 Vol. Ed. by V.V. Klyuev. Vol. 3: Ultrasonic control. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Principles of ultrasonic nondestructive testing*: Manual. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
4. Chuprin, V.A., Bizyulev, A.N., Konovalov, A.A. (2008) Specifics of ultrasonic thickness measurement of industrial facilities and products. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 2(40), 12–14 [in Russian].
5. Korolyov, M.V. (1980) *Pulse-echo thickness gauges*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Kretov, E.F. (2008) Ultrasonic thickness measurement in machine-building. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 2, 26–28 [in Russian].
7. Semerenko, A.V. (2008) Echo-method of ultrasonic thickness measurement. *Ibid.*, 2(40), 6–10 [in Russian].
8. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009) *Statistic phasometry*. Ternopil, TDTU [in Ukrainian].
9. Kuts, Yu.V., Eremenko, V.S., Monchenko, O.V., Lapiga, I.M. (2006) *Method of ultrasonic measurement of thickness of products*. Ukraine Pat. on utility model 35057, Int. Cl. G01B 17/02 [in Ukrainian].
10. Fisher, N.I. (2000) *Statistical analysis of circular data*. Cambridge University Press.

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО-ИМПУЛЬСНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ПРИ ИХ ЗНАЧИТЕЛЬНОМ ЗАТУХАНИИ

Е.Д. Близнюк¹, Ю.В. Куц², Е.В. Монченко¹, Ю.А. Олейник²

¹Национальный авиационный университет. 03058, г. Киев, просп. Космонавта Комарова, 1.

E-mail: au_409@ukr.net, monchenko_olena@ukr.net

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37.

E-mail: y.kuts@ukr.net

Развитие метода статистической фазовой ультразвуковой толщинометрии изделий из материалов со значительным затуханием ультразвуковых колебаний на основе анализа фазовой характеристики сигналов. Приведена методика и результаты моделирования процесса обработки сигналов в среде Matlab. Библиогр. 10, рис. 3.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, достоверность, статистическая фазометрия

IMPROVEMENT OF VALIDITY OF DETECTION OF SIGNALS OF ULTRASONIC PULSE-ECHO THICKNESS MEASUREMENT AT THEIR CONSIDERABLE ATTENUATION

E.D. Bliznyuk¹, Yu.V. Kuts², O.V. Monchenko¹, Yu.A. Oliynik²

¹Ntional Aviation University. 1 Kosmonavta Komarova Prosp., 03058, Kyiv, Ukraine.

E-mail: nau_409@ukr.net, monchenko_olena@ukr.net

²NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: y.kuts@ukr.net

The method of statistical phase ultrasonic thickness measurement of products from materials with considerable attenuation of ultrasonic oscillations, based on analysis of phase characteristic of signals, was developed. The procedure and results of modeling the signal processing in Matlab environment are given. 10 Ref., 3 Fig.

Keywords: ultrasonic nondestructive testing, validity, statistical phasometry

Надійшла до редакції
13.03.2019



Навчальний центр підприємства «ДП-ТЕСТ»

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

Кафедра приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

III НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
з міжнародною участю

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

17-20 вересня 2019 р.

Основні теми:

- законодавство в сфері неруйнівного контролю;
- технічні регламенти;
- метрологія і стандартизація;
- навчання та сертифікація персоналу;
- функціонування лабораторії неруйнівного контролю;
- сучасні засоби, приладдя, системи неруйнівного контролю.

В рамках події відбудеться низка практичних семінарів з демонстрацією новітнього обладнання та засобів контролю, круглі столи з дискусійних питань роботи служб неруйнівного контролю на підприємствах України.

Адреса оргкомітету:

03061, м.Київ, вул. Патріотів 103

Тел./факс:(044) 239-12-50, e-mail: support@ndt-ua.com, <http://www.dp-test.com>

Місце проведення:

Готель «VitaPark Аквадар». Україна, Черкаська обл., смт. Маньківка, вул. Лісова, 1.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ ДО ЗМІНИ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ

С.Р. Михайлов

НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Проведено аналіз чутливості вихідних параметрів рентгенотелевізійної системи непрямого перетворення: відношення сигнал/шум, вихідного сигналу та квантової ефективності детектування до зміни вхідних параметрів з використанням математичної моделі такої системи. Проаналізовано вплив нестабільності живлення рентгенівської трубки на вихідний результат розрахунків. Визначено групу вхідних параметрів моделі, невизначеність яких має найбільший вплив на вихідний сигнал рентгенотелевізійної системи. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: цифрова рентгенографія, рентгенотелевізійна система, рентгенівський екран, відношення сигнал/шум, квантова ефективність детектування, параметри моделі, невизначеність параметрів

В сучасній промисловості питання надійності виробленої продукції є одним з найважливіших. Для оцінки якості виготовленої продукції широко застосовуються методи неруйнівного контролю. Одним з найбільш надійних на сьогоднішній день є радіаційний метод з використанням рентгенівського випромінювання – рентгенографія.

Недоліки рентгенографії з проміжними носіями (рентгенівська плівка, запам'ятовуючі пластини) та потреба в високопродуктивних засобах контролю і діагностики стимулювали появу цифрової рентгенографії, засобами якої стало можливо підвищити продуктивність контролю і знизити його вартість [1, 2]. Такі системи для цифрової рентгенографії називаються рентгенотелевізійними системами (РТВС).

Постановка задачі і мета роботи. Розробка РТВС та покращення їх параметрів на сьогодні являється актуальною задачею, яку значно простіше вирішувати з використанням методів математичного та фізико-топологічного моделювання. Так, в роботах [3–6] була запропонована модель перетворення рентгенівського зображення в цифровий сигнал.

Ця математична модель взята за основу, оскільки за допомогою даної моделі можна підбирати оптимальні режими роботи РТВС для дослідження об'єктів з метою виявлення в них дефектів і неоднорідностей. Також, з її використанням є можливість оцінити сумісність елементів, які використовуються в РТВС; дослідити роботу системи в нестандартних режимах; зменшити кількість експериментальних випробувань шляхом оптимізації режимів роботи і т. д. Дана модель, на відміну від аналогічних [7–10], враховує ефект самопоглинання рентгенівських квантів в аноді трубки, та вплив об'єктива на процес формуван-

ня цифрового рентгенівського зображення. Перевагою даної моделі також є її універсальність, що дозволяє використовувати її для моделювання систем з рентгенівськими детекторами прямого перетворення, а також медичних систем.

Роботи [4–6] присвячені формуванню цифрового рентгенівського зображення, розрахунку вихідного сигналу та таких ключових параметрів РТВС, як відношення сигнал/шум на виході перетворювача і квантова ефективність детектування на малих просторових частотах. В реальних умовах при оцінці параметрів РТВС виникають певні труднощі, які пов'язані як з випадковими фізичними процесами в самій системі (шуми), нестабільністю її роботи в часі (зумовленою, наприклад, пульсаціями напруги джерела живлення трубки або поступовою деградацією компонентів системи), наявністю допусків та технологічні параметри компонентів системи, так і з певною невизначеністю параметрів, що задають режим роботи (наприклад, анодна напруга чи анодний струм рентгенівської трубки). Таким чином, була поставлена задача дослідження впливу невизначеності вхідних параметрів РТВС на її вихідні параметри.

Варто зазначити, що РТВС є нелінійною системою, а тому відхилення параметрів в область більших значень і відхилення в область менших значень по-різному впливає на вихідний результат, таким чином складно спрогнозувати характер його зміни.

Аналітичний аналіз чутливості системи до вхідних параметрів також ускладнений великою кількістю вхідних параметрів. Тому було вирішено використовувати метод Монте-Карло з псевдовипадковими значеннями вхідних параметрів в інтервалі їх можливих значень при певній кількості N_i перерахунків. Це дозволить провести статисти-

стичний аналіз ансамблю значень вихідних параметрів, які необхідно розрахувати.

Реалізація методу Монте-Карло в даному випадку полягає в багаторазовому розрахунку (N_t -разів) певної величини (наприклад, відношення сигнал/шум чи сигналу від дефекту) при зміні значень параметрів. Середнє значення відносно-го відхилення $\bar{\delta}_t$ результату x_{ii} від його значення X_t при чітко визначених вхідних параметрах оцінюється так:

$$\bar{\delta}_t = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} |x_{ii} - X_t|}{N_t X_t} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Застосування методу Монте-Карло для розв'язання даної задачі має такі особливості:

- генерація псевдовипадкових значень всіх параметрів у заданому інтервалі відбувається по рівномірному закону;
- генерація значень кожного параметра відбувається незалежно від інших параметрів;
- чим більше значення N_t , тим точнішою буде оцінка величини $\bar{\delta}_t$.

На першому етапі дослідження за допомогою математичної моделі оцінювався вплив невизначеності значень анодного струму I_a і анодної напруги U_a рентгенівської трубки на вихідні параметри рентгенотелевізійної системи. Параметри I_a та U_a визначають густину потоку рентгенівських квантів на виході трубки та їхню максимальну енергію. Тому так важливо при розробці РТВС досягти стабільного живлення рентгенівської трубки.

Були розраховані відхилення $\bar{\delta}_t$ нормованого вихідного сигналу від дефекту, відношення сигнал/шум та квантової ефективності детектування для РТВС з рентгено-електричним перетворювачем на основі різних рентгенівських екранів: монокристалічного йодиду цезію, активованого талієм CsI(Tl); оксисульфід гадолінію, активованого тербієм $Gd_2O_2S(Tb)$ та оксиду гадолінію, активованого європієм $Gd_2O_3(Eu)$, при кількості перерахунків $N_t = 1000$. При розрахунках невизначеними були значення анодної напруги U_a і анодного струму I_a рентгенівської трубки.

За отриманими результатами були побудовані графіки залежності відхилення відповідного параметра від відхилення значень анодної напруги і струму рентгенівської трубки. На рис. 1 приведені розраховані значення відхилення $\bar{\delta}_t$ для відношення сигнал/шум на виході рентгенівського перетворювача. З графіків видно, що невелика невизначеність значення анодного струму I_a сама по собі не змінює результат більше ніж на 5%, в той час як відхилення значення U_a вносить суттєву зміну в результат розрахунку.

В сучасних системах нестабільність параметрів випромінювання рентгенівських апаратів становить $\pm 0,1\%$, а неточність установки по струму і по напрузі знаходиться в межах $1...2\%$. Результати досліджень показали, що в цих межах неточності значень анодної напруги і струму відхилення вихідних параметрів знаходяться в межах 20% їх номінальних значень.

На другому етапі аналізувалися результати розрахунків при заданих інтервалах невизначеності для всіх основних вхідних параметрів РТВС. При цьому режим роботи рентгенотелевізійної системи було підібрано так, щоб сигнал знаходився в межах динамічного діапазону (тобто, не обмежувався).

Значення основних вхідних параметрів РТВС, що використовувалися для розрахунків, та допуски на них, наведені в табл. 1 [4, 5]. В таблиці: t_i – час накопичення тінювального рентгенівського зображення рентгенотелевізійною системою; Z – атомний номер матеріалу анода рентгенівської трубки; r – відстань від анода рентгенівської трубки до рентгенівського екрану РТВС; θ – кут

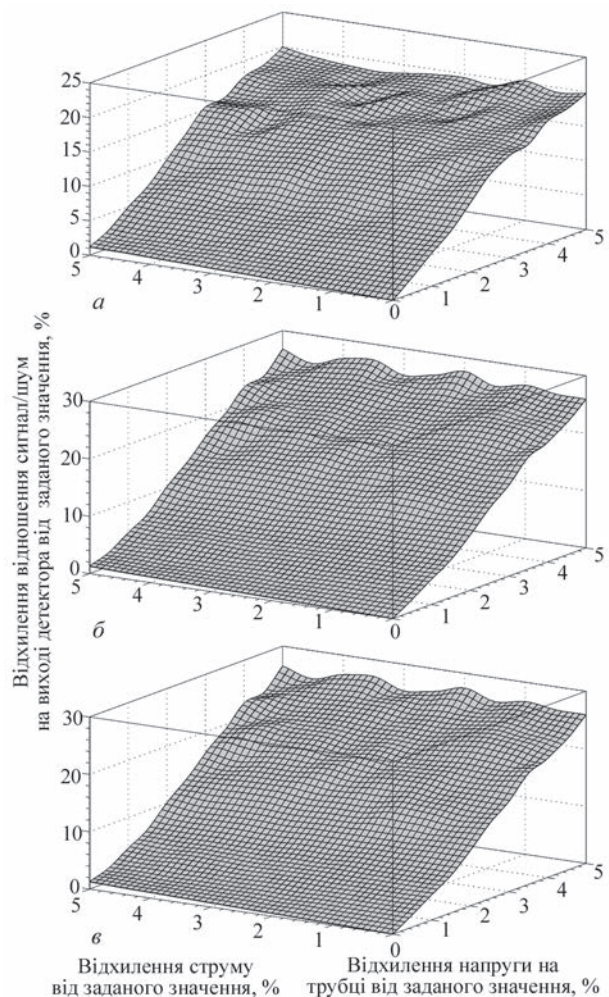


Рис. 1. Відхилення значення відношення сигнал/шум на виході рентгенівського перетворювача для РТВС з екраном: а – CsI(Tl); б – $Gd_2O_2S(Tb)$; в – $Gd_2O_3(Eu)$

Таблиця 1. Значення параметрів рентгенотелевізійної системи з допусками

| U_a , кВ | I_a , А | t_p , с | Z | r , см | θ , град | ρ_m , г/см ³ |
|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------------|
| 69,9 ± 1 % | 0,01 ± 1 % | 240 | 74 | 30 ± 1 % | 10 ± 5 % | 19,250 |
| ρ_ϕ , г/см ³ | H_ϕ , см | ρ_0 , г/см ³ | H_0 , см | d_e , мм | $d_{ПЗЗ}$, мм | ξ_{opt} |
| 2,699 | 0,3 ± 5 % | 7,874 | 1 ± 5 % | 168,51 ± 5 % | 11 | 0,07 ± 5 % |
| ω_{opt} | θ_{opt} | V_{opt} | V_{opt} | K_{glass} | M_{glass} | A_{glass} |
| 0 | 1/1,4 | 0 | 0 | 0,05 ± 5 % | 4 | 0,01 ± 5 % |
| H_{glass} | $A_{ПЗЗ}$, мкм ² | $G_{кам}^{-1}$, е-/АЦП | ρ_B , г/см ³ | H_B , см | | |
| 0,7 ± 5 % | 6,45×6,45 | 0,0267 ± 5 % | 1,848 (Be) та 8,960 (Cu) | 0,7 ± 5 % (Be) та 0,05 ± 5 % (Cu) | | |
| Екран | ρ_e , г/см ³ | H_e , см | $C_{эф}$ | K_γ | | |
| CsI(Tl) | 4,51 | 0,4 ± 5 % | 0,15 ± 1 % | 0,090 ± 5 % | | |
| Gd ₂ O ₂ S(Tb) | 7,44 | 0,02 ± 5 % | 0,18 ± 1 % | 0,966 ± 5 % | | |
| Gd ₂ O ₃ (Eu) | 7,07 | 0,0145 ± 5 % | 0,17 ± 1 % | 0,890 ± 5 % | | |

нахилу анода рентгенівської трубки; ρ_m – густина матеріалу анода рентгенівської трубки; ρ_B , ρ_ϕ – густини матеріалу вихідного вікна та фільтру трубки; H_B , H_ϕ – товщини вихідного вікна та фільтру трубки; ρ_0 , H_0 – густина матеріалу та товщина контрольованого об’єкта; $d_{ПЗЗ}$, d_e – діагоналі ПЗЗ-матриці та робочого поля РТВС, відповідно; ξ_{opt} – коефіцієнт, що характеризує втрати світла на шляху до об’єктива; ω_{opt} – кутова координата поля, тобто кут, утворений віссю пучка, що формує дану точку, з віссю об’єктива; θ_{opt} – відносний отвір об’єктива; V_{opt} – коефіцієнт віньеткування; $V_{пар}$ – паразитна засвітка в об’єктиві; K_{glass} – коефіцієнт відбиття скла; M_{glass} – кількість поверхонь скла, що межують із повітрям; A_{glass} – коефіцієнт поглинання світла на 1 см товщини скла; H_{glass} – сумарна товщина всіх лінз об’єктива; $A_{ПЗЗ}$ – площа пікселя ПЗЗ-матриці; $G_{кам}$ – підсилення камери; ρ_e та H_e – густина матеріалу та товщина рентгенівського екрана; $C_{эф}$ – конверсійна ефективність рентгенівського екрана; K_γ – коефіцієнт спектрального узгодження рентгенівського екрана і ПЗЗ-матриці.

На основі даних, отриманих із розрахунків, було побудовано гістограми для РТВС з різними екранами для таких вихідних величин: нормованого сигналу від дефекту, відношення сигнал/шум на виході перетворювача та квантової ефективності детектування перетворювача при $N_t = 2000$.

На рис. 2 приведені гістограми для відношення сигнал/шум. Дані на гістограмах мають розподіл, близький до нормального. Вони були апроксимовані функціями Гауса (на рис. 2 суцільні криві) з математичним очікуванням \bar{x}_i та середньоквадратичним відхиленням σ_i . За критерій вибору кількості розрахунків N_t було взято умову мінімальності різниці між дійсним значенням величини нормованого сигналу від дефекту та його математичним очікуванням \bar{x}_i .

При малому значенні N_t характер гістограм відмінний від нормального розподілу, а даних недо-

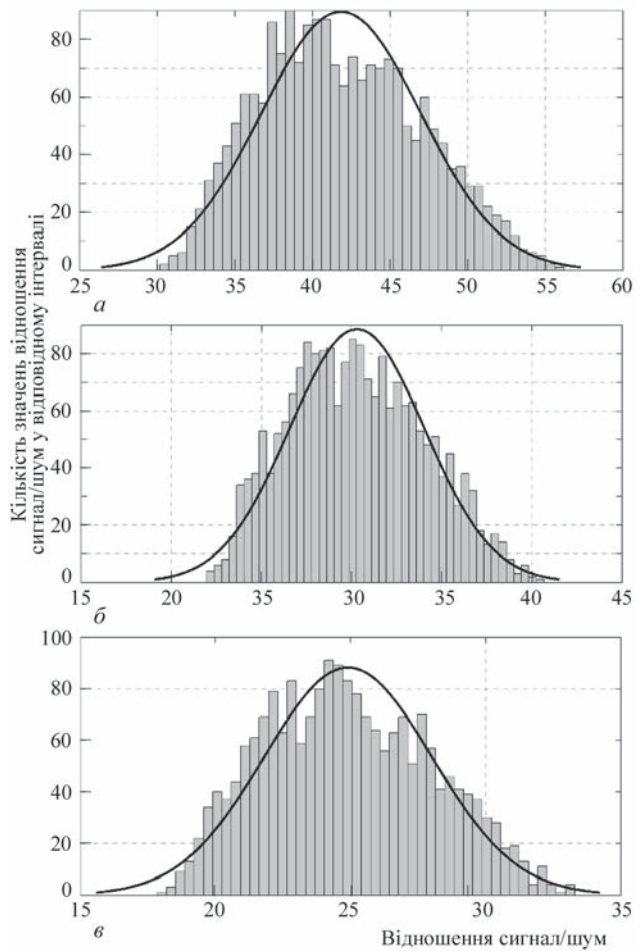


Рис. 2. Гістограма розподілу відношення сигнал/шум на виході перетворювача в рентгенотелевізійній системі з різними екранами: а – CsI(Tl) при $N_t = 2000$, апроксимація даних функцією Гауса ($\bar{x}_i = 41,835$, $\sigma_i = 5,148$); б – Gd₂O₂S(Tb) при $N_t = 2000$, апроксимація даних функцією Гауса ($\bar{x}_i = 30,297$, $\sigma_i = 3,741$); в – Gd₂O₃S(Eu) при $N_t = 2000$, апроксимація даних функцією Гауса ($\bar{x}_i = 24,903$, $\sigma_i = 3,106$)

статньо для їх аналізу. При збільшенні N_t вище 500 відносно лінійне відхилення математичного очікування ансамблю значень нормованого сигналу від дефекту від дійсного його значення

Таблиця 2. Результати обробки даних з розрахунків за методом Монте-Карло нормованого сигналу від дефекту, відношення сигнал/шум на виході перетворювача та квантової ефективності перетворювача

| Параметр | Екран | N_t | X_t | \bar{x}_{it} | σ_t | $\bar{\delta}_t$ | $\delta_{t \max}$ | $\frac{ X_t - \bar{x}_{it} }{X_t}$ |
|---|--------------------------------------|-------|--------|----------------|------------|------------------|-------------------|------------------------------------|
| Нормований сигнал від дефекту | CsI(Tl) | 10 | 0,301 | 0,308 | 0,117 | 0,331 | 0,661 | 0,023 |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 0,160 | 0,157 | 0,043 | 0,224 | 0,394 | 0,022 |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 0,107 | 0,107 | 0,022 | 0,183 | 0,282 | 0,003 |
| | CsI(Tl) | 500 | 0,301 | 0,301 | 0,078 | 0,209 | 0,801 | 0,030 |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 0,160 | 0,168 | 0,044 | 0,227 | 0,782 | 0,051 |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 0,107 | 0,110 | 0,028 | 0,213 | 0,898 | 0,028 |
| | CsI(Tl) | 2000 | 0,301 | 0,312 | 0,079 | 0,214 | 0,971 | 0,036 |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 0,160 | 0,164 | 0,041 | 0,211 | 0,878 | 0,021 |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 0,107 | 0,111 | 0,028 | 0,215 | 0,853 | 0,035 |
| Відношення сигнал/шум на виході перетворювача (розмір дефекту 2 % товщини пластини) | CsI(Tl) | 10 | 41,450 | 40,992 | 8,053 | 0,169 | 0,284 | – |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 30,248 | 29,580 | 3,900 | 0,106 | 0,185 | – |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 24,710 | 24,443 | 2,536 | 0,088 | 0,140 | – |
| | CsI(Tl) | 500 | 41,450 | 41,692 | 5,090 | 0,101 | 0,333 | – |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 30,248 | 30,698 | 3,920 | 0,108 | 0,321 | – |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 24,710 | 24,830 | 3,107 | 0,104 | 0,353 | – |
| | CsI(Tl) | 2000 | 41,450 | 41,835 | 5,148 | 0,103 | 0,356 | – |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 30,248 | 30,297 | 3,741 | 0,102 | 0,344 | – |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 24,710 | 24,903 | 3,106 | 0,104 | 0,348 | – |
| Квантова ефективність детектування | CsI(Tl) | 10 | 0,072 | 0,070 | 0,002 | 0,039 | 0,057 | – |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 0,222 | 0,218 | 0,006 | 0,029 | 0,067 | – |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 0,251 | 0,250 | 0,010 | 0,029 | 0,080 | – |
| | CsI(Tl) | 500 | 0,072 | 0,071 | 0,003 | 0,030 | 0,108 | – |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 0,222 | 0,219 | 0,009 | 0,034 | 0,111 | – |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 0,251 | 0,247 | 0,010 | 0,034 | 0,109 | – |
| | CsI(Tl) | 2000 | 0,072 | 0,071 | 0,003 | 0,030 | 0,114 | – |
| | Gd ₂ O ₂ S(Tb) | | 0,222 | 0,219 | 0,009 | 0,034 | 0,118 | – |
| | Gd ₂ O ₃ (Eu) | | 0,251 | 0,248 | 0,010 | 0,034 | 0,121 | – |

$|X_t - \bar{x}_{it}| / X_t$ залишається на рівні 2...3 %. Це є результатом низької ймовірності такої події, коли всі відхилення від дійсного значення вхідних параметрів будуть нульовими. Також на це впливає і нелінійність системи.

Результати обробки даних з розрахунків за методом Монте-Карло зведені в табл. 2.

Висновки

На основі проведених досліджень було встановлено, що вихідні параметри рентгенотелевізійної системи найбільш чутливі до зміни таких вхідних параметрів: напруга на рентгенівській трубці U_a , відстань від анода рентгенівської трубки до рентгенівського екрану r , конверсійна ефективність екрана $C_{\text{эф}}$, коефіцієнт спектрального узгодження рентгенівського екрана і ПЗС-матриці K_γ , товщина досліджуваного об'єкта H_0 , підсилення телевізійної камери $G_{\text{кам}}$.

В умовах, коли невизначеність параметрів моделі $U_a, I_a, r, C_{\text{эф}}, K_\gamma, H_0, G_{\text{кам}}$, не перевищує 1 %, а невизначеність величин всіх інших вхідних па-

раметрів – не більше 5 %, відхилення результату розрахунку певної характеристики РТВС в середньому не перевищуватиме 20 %.

Список літератури

1. Усачев Е.Ю., Усачев В.Е., Гнедин М.М. и др. (2014) Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов. *Контроль. Диагностика*, **6**, 60–64.
2. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шило Д.С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–35.
3. Михайлов С.Р. (2002) Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля. *Электроника и связь*, **16**, 59–70.
4. Шило Д.С. (2015) Моделирование процесів формування цифрового рентгенівського зображення. *Там же*, **6**, 34–41.
5. Шило Д.С., Михайлов С.Р., Писаренко Л.Д. (2016) Квантовая эффективность детектирования цифровых рентгенотелевизионных систем на основе сцинтилляционных экранов и ПЗС-матриц. *Неразрушающий контроль и диагностика*, Минск, Институт прикладной физики НАН Беларуси, **4**, 25–38.
6. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Шило Д.С. (2017) Моделирование рентгеновских изображений цифровой рентгенотелевизионной системы на основе сцинтилляционного экрана и ПЗС-матрицы. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 17–22.

7. Viswanathan K. (2018) *XRaySim user manual*, [Online]. Available: <http://xraysim.sourceforge.net/index.htm>. [Accessed 30 May 2018].
8. Duvauchelle P., Freud N., Kaftandjian V., Babot D. (2000) A computer code to simulate X-ray imaging techniques. *NUCL INSTRUM METH B*, **170**, pp. 245–258.
9. Lazos D., Bliznakova K., Kolitsi Z.Z., Pallikarak N. (2003) An integrated research tool for X-ray imaging simulation. *Comput Meth Prog Bio*, **70**, 241–251.
10. Kengyelics S.M., Laura L.A., Treadgold A., Davies A.G. (2018) X-ray system simulation software tools for radiology and radiography education. *Comput Biol Med*, **93**, 175–183.
4. Shilo, D.S. (2015) Modeling of processes of forming the digital X-ray image. *Ibid.*, **6**, 34–41 [in Russian].
5. Shilo, D.S., Mikailov, S.R., Pisarenko, L.D. (2016) Quantum efficiency of detection of digital cineradiography systems based on scintillation screens and CCD matrices. *Nerazrush. Kontrol i Diagnostika*, **4**, 25-38 [in Russian].
6. Troitskii, V.A., Mikhaylov, S.R., Shylo, D.S. (2017) Modeling of X-ray images of digital X-ray-TW system based on scintillation screen and CCD matrix. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 17-22 [in Russian].
7. Viswanathan, K. (2018) *XRaySim user manual*. <http://xraysim.sourceforge.net/index.htm>. [Accessed 30 May 2018].
8. Duvauchelle, P., Freud, N., Kaftandjian, V., Babot, D. (2000) A computer code to simulate X-ray imaging techniques. *NUCL INSTRUM METH B*, **170**, 245–258.
9. Lazos, D., Bliznakova, K., Kolitsi, Z.Z., Pallikarak, N. (2003) An integrated research tool for X-ray imaging simulation. *Comput. Meth. Prog. Bio.*, **70**, 241–251.
10. Kengyelics, S.M., Laura, L.A., Treadgold, A., Davies A.G. (2018) X-ray system simulation software tools for radiology and radiography education. *Comput. Biol. Med.*, **93**, 175–183.

References

1. Usachev, E.Yu., Usachev, V.E., Gnedin, M.M. et al. (2014) Digital radiography system for revision of welded joints of pipelines in operation. *Kontrol. Diagnostika*, **6**, 60-64 [in Russian].
2. Troitskii, V.A. Mikhaylov, S.R., Pastovenskiy, R.A., Shilo, D.S. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 23-35 [in Russian].
3. Mikhailov, S.R. (2002) Modeling of shadow X-ray image of the controlled object in roentgenoscopic systems of nondestructive testing. *Elektronika i Svyaz*, **16**, 59–70 [in Russian].

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ К ИЗМЕНЕНИЯМ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

С.Р. Михайлов

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Проведен анализ чувствительности выходных параметров рентгентелевизионной системы непрямого преобразования: отношения сигнал/шум, выходного сигнала и квантовой эффективности детектирования к изменению входных параметров с использованием математической модели этой системы. Проанализировано влияние нестабильности питания рентгеновской трубки на выходной результат расчетов. Определена группа входных параметров модели, неопределенность которых оказывает наибольшее влияние на выходной сигнал рентгентелевизионной системы. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: цифровая рентгенография, рентгентелевизионная система, рентгеновский экран, отношение сигнал/шум, квантовая эффективность детектирования, параметры модели, неопределенность параметров

INVESTIGATION OF THE SENSITIVITY OF OUTPUT PARAMETERS OF X-ray TELEVISION SYSTEM TO THE CHANGE OF INPUT PARAMETERS

S.R.Mikhailov

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: fel@kpi.ua

Analysis of the sensitivity of output parameters of X-ray television system of indirect transformation: signal/noise ratio, output signal and quantum detection efficiency to the change of input parameters was performed, using the mathematical model of such a system. The influence of instability of power supply to X-ray tube on output calculation result was analyzed. The group of input parameters of the model was determined, the uncertainty of which has the strongest effect on output signal of X-ray television system. 10 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.

Keywords: digital radiography, X-ray television system, X-ray screen, signal/noise ratio, quantum detection efficiency, model parameters, parameter uncertainty

Надійшла до редакції
22.05.2019

Новая книга

Дефектоскопия XXI века. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по развитию технологий неразрушающего контроля сварных соединений / Под ред. проф. В.А. Троицкого. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2018. – 196 с.

Сборник содержит 11 ранее опубликованных статей сотрудников отдела неразрушающих методов контроля качества сварных соединений ИЭС им. Е.О. Патона, а также рекламные материалы различных методов неразрушающего контроля.



ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДИАМЕТРА УЧАСТКА НАГРЕТОГО ИЗДЕЛИЯ

В.А. Порев, А.С. Томашук

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37.
E-mail: tomashuk.alexander@gmail.com

В процессе высокотемпературного изготовления или обработки цилиндрического изделия необходимо получать информацию о его энергетических и геометрических параметрах. Для достижения поставленной цели наиболее удачным решением станет использование оптических методов и методов цифровой обработки изображений. Оптические методы, которые основаны на законах геометрической оптики, преломления, интерференции и дифракции, позволяют производить измерения требуемых параметров с высокой точностью, что позволяет совершенствовать качество изготавливаемого изделия. В работе описаны математическая модель и конструкция оптического устройства для проведения процедур измерений диаметра и температуры с высокой точностью. Методы позволяют производить контроль диаметра и температуры на расфокусированном изображении. Результаты разработки оптического устройства привязаны к математической модели бесфильтрного волочения проволоки, как одного из высокотемпературных процессов. Результаты калибровки устройства по температуре показали некоторые преимущества использования предложенного бесконтактного метода над контактными – термометра с термопарой. Предложен подход для измерения температуры поверхности изделия, которое движется с некоторой скоростью, которая равна скорости формирования изображения. Данный подход основан на методах цифровой обработки изображений. Библиогр. 21, рис. 6.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, оптика, дифракция, температура, диаметр, эффект памяти формы, производственный процесс

Высокотемпературные производственные процессы подразумевают использование контроля энергетических и геометрических параметров изделия, которое изготавливается (горячий прокат, бесфильтренное волочение и др.) или обрабатывается (гомогенность сплава, зонная перекристаллизация и др.).

Если изделие имеет цилиндрическую форму, а его нагрев является бесконтактным, к примеру, с использованием индукционного нагревателя, то в таком случае можно использовать оптические методы неразрушающего контроля для оценки состояния деформации его поверхности.

В процессе оптического контроля изделий небольшого диаметра обычно требуется применение методов и оптических законов, которые предполагают высокоточное измерение параметров этого изделия – температурное распределение на его поверхности и геометрические параметры (диаметр, овальность и др.).

Для осуществления высокоточных измерений геометрических параметров изделий возможно применение законов интерференции (голография) и, как частный случай интерференции – дифракции (формирование зон Френеля) [1–3].

Для осуществления высокоточных измерений энергетических параметров изделий, к примеру, при проведении оптической пирометрии, возможно применение законов преломления и дифракции.

Высокотемпературные процессы и материалы.

Применение оптического устройства для высокоточных измерений одновременно двух параметров нагретого изделия возможны в следующих высокотемпературных процессах:

- при получении монокристаллов (бестигельная зонная плавка [4–6]);
- в процессе гомогенизации сплава;

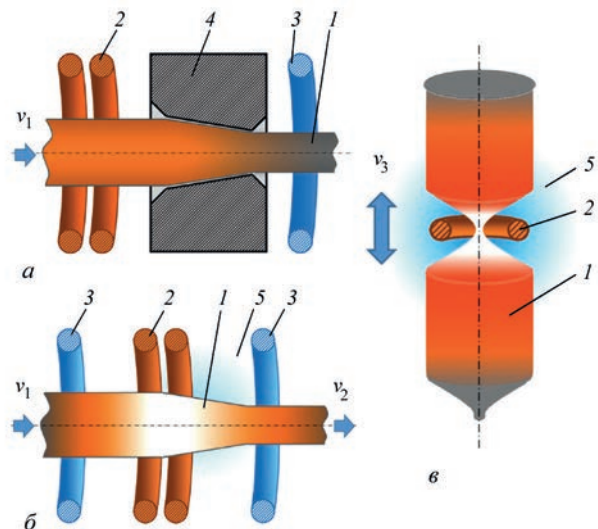


Рис. 1. Схемы высокотемпературных процессов: а – горячее волочение; б – бесфильтренное волочение; в – бестигельная зонная плавка (1 – изделие; 2 – элемент для бесконтактного нагрева участка изделия; 3 – элемент для бесконтактного охлаждения участка изделия; 4 – инструмент для обжатия материала; 5 – атмосфера; v_1 – скорость подачи; v_2 – скорость волочения; v_3 – скорость перемещения элемента для бесконтактного нагрева участка изделия)

- в процессах обработки давлением – горячего проката и горячего волочения [7];
- в процессе ротационнойковки;
- в процессе бесфильтрного волочения [8–12];
- в других родственных процессах (к примеру, 4D печать) [13].

На рис. 1 показаны некоторые схемы высокотемпературных процессов для общего ознакомления.

На рис. 2 показана схема бесфильтрного волочения. За предложенной моделью из работы [12], которая выражает потери тепла, принимаем в параметры: продольную координату x , температуру поверхности изделия T , время t_b площадь A поперечного сечения изделия в заданной координате $x_{пр}$, при этом площадь $A = \pi R_{изд}^2$, где $R_{изд}$ – радиус изделия. Данное выражение из предложенной модели имеет следующий вид:

$$Q_L(t_b, x_{пр}) = 2\sqrt{\pi A(t_b, x_{пр})} \times h(T(t_b, x_{пр}) - T_0) dx_{пр} \quad (1)$$

где h – коэффициент переноса охлаждения; T_0 – температура размягчения, причем $T_0 < T$.

Приоритетными материалами, которые подвергаются высокотемпературным процессам изготовления и обработки, являются:

- сплавы с эффектом памяти формы, такие как, NiTi (гомогенность, обработка давлением) [14, 15];
- металлы повышенной сложности обработки (к примеру, вольфрам);
- монокристаллы металлов и неметаллов (к примеру, кремний).

Измерение диаметра изделия. Выполнить измерение линейного размера объекта с высокой точностью можно с помощью подхода, который сочетает в себе законы геометрической оптики и формирования зон Френеля – дифракционный

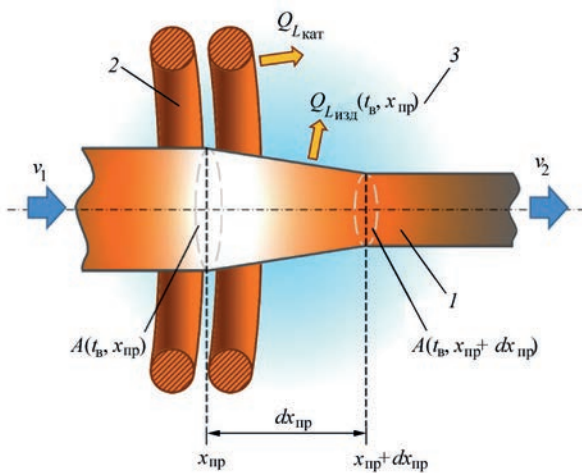


Рис. 2. Схема бесфильтрного волочения изделия: 1 – изделие; 2 – индукционная катушка; 3 – инертная атмосфера (остальные обозначения см. в тексте)

метод. Устройство для измерения диаметра протяженных цилиндрических изделий, которое использует этот метод, описано в работе [2].

В основе подхода лежит использование точечного источника освещения для подсвечивания объекта, геометрические параметры которого исследуются, системы для регистрации изображения его тени и образовавшейся на границе тени дифракционной картины, а также манипуляции в дистанциях между ними. Если между изделием и регистрирующей системой располагается еще и оптическая

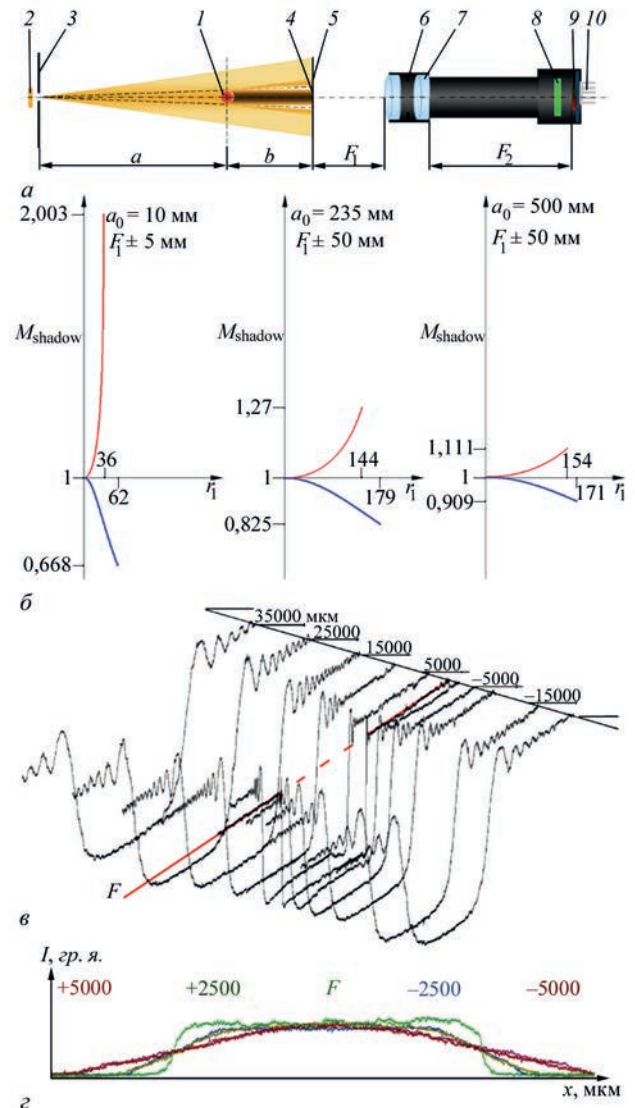


Рис. 3. Схема формирования изображения нагретого изделия оптической системой: а – схема получения тени изделия и дифракционной картины; б – отношение масштаба к радиусу первой зоны Френеля; в – отношение полученного изображения от дистанции между изделием и точкой фокусирования лучей оптической системой; г – распределение яркости изображения нагретого изделия. 1 – изделие; 2, 3 – светодиоды и щель (имитация точечного источника освещения); 4 – тень; 5 – дифракционная картина; 6 – диафрагма; 7 – линза; 8 – светофильтр; 9 – приемник излучения; 10 – система охлаждения; а – дистанция между точечным источником и изделием; б – дистанция между изделием и оптической системой; F_1 и F_2 – переднее и заднее фокусные расстояния

система (объектив) для проведения одновременно-го контроля диаметра и температуры поверхности изделия, то должно соблюдаться условие $r_1 \geq y_{\text{мин}}$, где r_1 – радиус первой зоны Френеля, а $y_{\text{мин}}$ – минимальная разрешающая способность.

На рис. 3 показана схема формирования изображения нагретого изделия с использованием известного дифракционного метода и оптической системы [16].

Масштаб линейного увеличения оптической системы $M_{\text{ос}}$ выражается

$$M_{\text{ос}} = (n_1 F_2) / (n_2 F_1), \quad (2)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления в средах, со стороны изделия и приемника излучения, соответственно.

Масштаб тени $M_{\text{тени}}$ выражается

$$M_{\text{тени}} = b\lambda / r_1^2, \quad (3)$$

где λ – длина волны.

На рис. 4 показана схема определения диаметра изделия с использованием известного дифракционного метода.

Радиус первой зоны Френеля может быть получен из уравнения

$$r_1 = \Delta_r r_1 (r_3 - r_1) = 1,366 \Delta_r. \quad (4)$$

Для осуществления измерения дистанции b , предварительно, формируется база данных из, по крайней мере, двух массивов значений $M_{\text{тени}}$ и r_1 , как показано на рис. 3, б [16]. После измерения радиусов первых зон Френеля можно провести измерение дистанции b по уравнению (3).

Измерение диаметра можно провести с помощью уравнения

$$D_{\text{изд}} = l_{\text{эл}} ((x_{\text{пр}} - x_{\text{л}}) / (M_{\text{ос}} M_{\text{тени}})) - 2btg\beta, \quad (5)$$

где $l_{\text{эл}}$ – физический размер стороны одного фотоэлектрического элемента; β – угол, который показывает как распределяется пучок при изменении дистанции между изделием и точкой фокуса.

На рис. 5 показан график отношения результатов измеренных диаметров проволок различных диаметров от дистанции b между проволокой и точкой фокусирования лучей оптической системой. Из графика видна зависимость расхождения пучка от пространственной частоты (диаметр изделия).

Измерение температуры изделия. Гауссово распределение амплитуды (яркости изделия) после прохождения через линзу выражается как (подробнее в работе [17])

$$a(m, n) = \frac{2\pi}{K} a_0 \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^4 + (Z/k)^2}} \times \exp\left(-\frac{m^2 + n^2}{2\omega^2}\right) \times \cos\left(\omega t_M - K \left[Z + \frac{m^2 + n^2}{2} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{F} \right) \right] - \alpha\right), \quad (6)$$

где m, n – пространственные координаты; K – волновое число; a_0 – начальное распределение амплитуды; ω_0, ω – ширина распределения интенсивности поля, начальная и на расстоянии Z , соответственно; Z – расстояние до плоскости линзы; t_M – момент времени; R – радиус кривизны; F – фокусное расстояние линзы.

На рис. 3, з показано распределение яркости, которое было получено экспериментально. Из результата видно, что для измерений температуры поверхности нагретого изделия можно использовать центральную точку в распределении яркости, которая соответствует продольной координате $x_{\text{пр}}$, которую можно наблюдать в параметрах в уравнении (1).

Суммарный поток излучения $\Phi_{\Sigma}(x, y, \lambda)$ может быть выражен с помощью следующих компонентов [18]: $\tau_{\text{ср}}$ – коэффициент пропускания среды (атмосферы); $\Phi_{\text{изд}}$ – поток излучения, который образован нагретым изделием; $\Phi_{\text{подсв}}$ – поток излучения, который был образован точечным источником излучения; $\tau_{\text{изд}}$ – коэффициент пропускания изделия, для металлов и сплавов равен 1; $\Phi_{\text{внеш}}$ – поток излучения, который образован внешним источником излучения; $\rho_{\text{изд}}$ – коэффициент отражения изделия, причем каждый из компонентов принимает в параметры (x, y, λ) , и выражается

$$\Phi_{\Sigma} = \tau_{\text{ср}} (\Phi_{\text{изд}} + \Phi_{\text{подсв}} \tau_{\text{изд}} + \Phi_{\text{внеш}} \rho_{\text{изд}}). \quad (7)$$

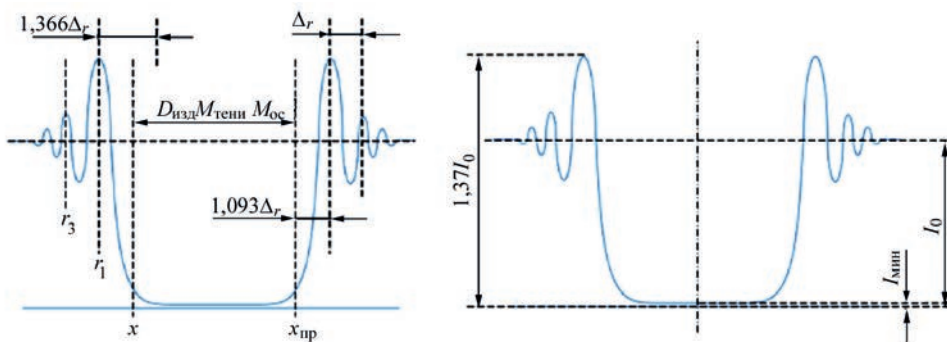


Рис. 4. Схема определения диаметра изделия известным дифракционным методом: Δ_r – длина между двумя зонами Френеля; I_0 – яркость фона; $I_{\text{мин}}$ – минимальная яркость

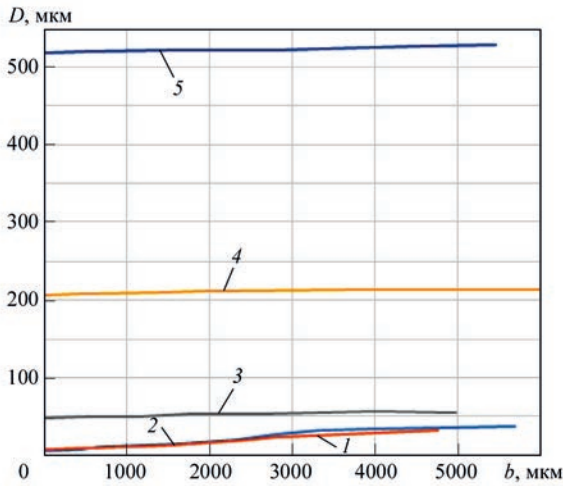


Рис. 5. Отношение результатов измеренных диаметров проволок от дистанции b между проволокой и точкой фокуса: 1 – углеродное волокно, 6 мкм; 2 – волокно, 5; 3 – NiCr, 50; 4 – NiCr, 202; 5 – NiCr, 519

Яркость $B(x, y, \lambda)$ в плоскости изделия, как известно, выражается

$$B(x, y, \lambda) = \frac{\Phi_{\Sigma}(x, y, \lambda)}{d\Omega dS(x, y) \cos \alpha} \quad (8)$$

Яркость абсолютно черного тела $B_{\text{ачт}}(x, y, \lambda, T)$ по формуле Вина, как известно из работ [18–20], выражается

$$B_{\text{ачт}}(x, y, \lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (9)$$

где C_1 – константа; $C_1 = 3,7418 \cdot 10^{20}$, Вт·нм·м⁻¹; C_2 – константа, $C_2 = 14,388 \cdot 10^6$, нм·К.

Коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ материала (нечерного тела) выражается как

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{B(x, y, \lambda, T)}{B_{\text{ачт}}(x, y, \lambda, T)} \quad (10)$$

Для измерения температуры поверхности нагретого тела мы используем некоторый узкий диапазон яркостей изображения (измеряется в градациях яркости, *гр. я.*), который способен регистрировать приемник излучения (CCD- или CMOS-матрица), а также изменением частоты сканирования (время экспозиции) приемника излучения. Поэтому диапазон измеряемых значений температуры расширен и, что самое главное, не зависит от разрешающей способности оптической системы.

Как видно из формулы (10), температура T является равной при обеих яркостях с учетом коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T)$.

В обоих случаях частота сканирования приемника излучения будет равна. Следовательно, на каждой из частот (интервале времени) можно проводить процедуру измерения без ущерба для результата.

На рис. 6 показаны результаты калибровки оптического устройства по температуре поверхностей

проволок различного сплава. В оптической системе использовался интерференционный светофильтр, который выделяет длину волны $\lambda = 532$ нм.

Калибровка проводилась на яркостях \bar{I} , $\bar{I} - \Delta$ и $\bar{I} + \Delta$, где Δ – некоторый допустимый диапазон яркости, *гр. я.*

При калибровке использовали:

- регулируемый лабораторный блок питания для электроконтактного нагрева участка проволоки;
- термометр Mastech MS6514 с термопарой К-типа для получения значений температуры поверхности проволоки.

На рис. 6, а, в из-за больших отклонений в яркости для нагретых проволок малого диаметра было решено привести результаты только для значения яркости $\bar{I}(T)$.

Как видно из рис. 6, результаты прокалиброванной температуры несколько расходятся. Это может указывать на нелинейную характеристику приемника излучения.

Кроме того, можно видеть, что результаты измеренной температуры с помощью термопары различны для разных диаметров проволок

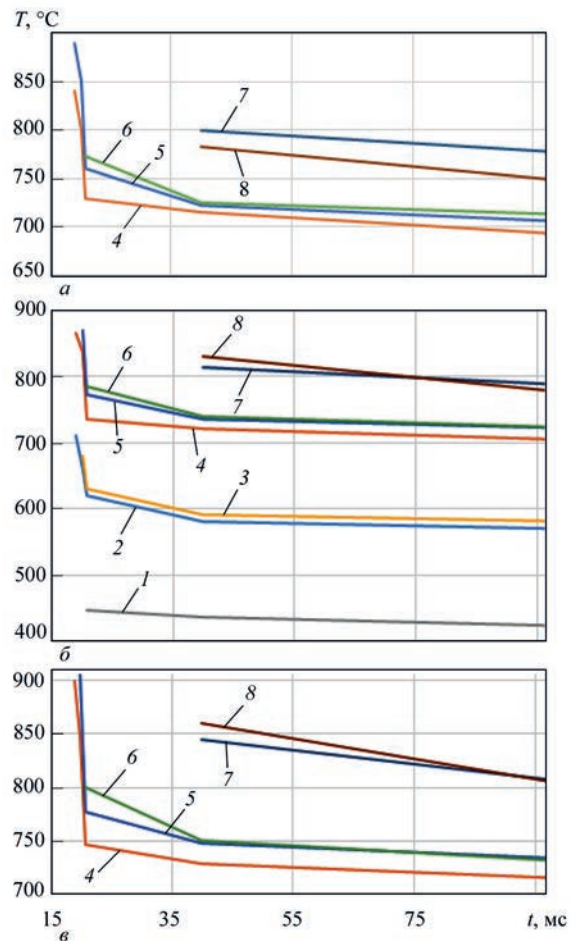


Рис. 6. Результаты калибровки оптического устройства по предлагаемому методу при: а – $\bar{I} - \Delta$; б – \bar{I} ; в – $\bar{I} + \Delta$ (1 – NiCr, 56 мкм; 2 – Al, 202; 3 – NiCr, 202; 4 – Al, 494; 5 – NiCr, 519; 6 – сталь, 518; 7 – Ni, 500; 8 – Ti, 487)

из одного сплава при одинаковой яркости $\bar{I}(T)$ (рис. 6, б). Однако визуальное наблюдение за состоянием изделия меньшего диаметра показало, что его температура не может быть меньше, чем температура изделия большего диаметра. В соответствии с этим, можно ввести поправочный коэффициент для коррекции результата, который учитывает геометрические параметры изделия.

Проведение измерений в динамическом режиме. При проведении контроля параметров нагретого изделия, которое движется продольно с некоторой скоростью v , возникает проблема связанная с получением четкого изображения оптическим устройством. Кроме того, возникает проблема измерения динамической температуры его поверхности. То есть, если даже скорость v движения изделия равна скорости сканирования приемника излучения, то мы все равно имеем проблему связанную с измерением температуры из-за квантовой природы электромагнитного излучения.

После формирования изображения нагретого изделия оптическим устройством, возникает вопрос, каким образом проводить измерение его температуры, ведь ранее мы установили, что температура может быть измерена в центральной точке (см. рис. 2).

Из методов обработки цифровых изображений мы имеем метод реконструкции смазанных изображений, который может быть применен в данном случае.

В общей форме уравнение искаженного, смазанного, изображения $I(x, y)$ имеет вид [21]

$$I(x, y) = h(x, y) * I_d(x, y) + \eta(x, y), \quad (11)$$

где h – искажающий оператор; $*$ – операция свертки; I_d – действительное изображение; η – функция шума.

При переходе к пространственной фильтрации, уравнение можно переписать как

$$\begin{aligned} I(x, y) - \eta(x, y) &= \\ &= \int_0^t I_d \left(x - \frac{t_{ин} l_x}{t}, y - \frac{t_{ин} l_y}{t} \right) dt, \quad (12) \\ &= \sum_{p=-a}^a \sum_{q=-b}^b h(p, q) I_d(x - p, y - q) \end{aligned}$$

где $t_{ин}$ – отрезок времени с общего времени экспозиции t ; l_x, l_y – общая длина пройденного пути за время экспозиции t ; p, q – координаты пространственного фильтра.

Если $t_{ин} = t$, то $x_{пр} = l_x = l_y$, а это означает, что в течение экспозиции на каждый из фотозлектрических элементов накапливается определенное количество фотонов в четкой закономерности.

Проанализировав искажающую функцию, и используя результат анализа в виде пространствен-

ной фильтрации, можно получить более детальную информацию о поведении термодинамической температуры поверхности нагретого изделия.

Выводы

Приведены краткие сведения относительно высокотемпературных процессов для изготовления и обработки цилиндрических изделий.

Предложена математическая модель для измерения диаметра и температуры нагретого цилиндрического изделия с помощью оптического метода. Модель может быть использована для контроля энергетических и геометрических параметров такого изделия во время его высокотемпературного изготовления.

Приведены результаты калибрования оптического устройства по температуре предложенным методом измерения температуры, который заключается в изменении частоты сканирования приемника излучения. Прослеживается явное преимущество использования оптического устройства перед термометром с термопарой для измерений температуры поверхностей тонких нагретых объектов.

Предложен подход для измерения температуры нагретой поверхности изделия, которое движется с некоторой скоростью. Подход основан на использовании метода восстановления смазанного изображения из теории методов цифровой обработки изображений.

Список литературы

1. Лемешко Ю.А., Чугуй Ю.В. (2005) Дифракционный метод измерения диаметров круговых отражающих цилиндров. *Автоматрия*, 41, 6, 3–12.
2. Fedorov M.E. (2005) Optical laser diffraction transducer for measuring single-wire electric cable eccentricity. *IOP conference series: Materials and science and engineering*, 81, 012074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/81/1/012074>
3. Khodier S.A. (2004) Measurement of wire diameter by optical diffraction. *Optics & laser technology*, 36, 63–67.
4. Порев В.А., Порев Г.В. (2014) Компенсация систематической погрешности измерения температуры поверхности зоны плавки. *Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова*, 2, 52–56.
5. Порев В.А. (2013) Контроль температурного режиму електронно-променевої безтигельної зонної плавки кремнію. *Методи та прилади контролю якості*, 1(30), 108–113.
6. Якименко Ю.І., Порев Г.В., Порев В.А. (2003) Вдосконалення методів і засобів вимірювання параметрів електронно-променевої безтигельної зонної плавки. *Там само*, 11, 71–77.
7. Порев В.А., Томашук А.С. (2017) Контроль параметрів нагретой проволоки в процессе волочения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 52–55. <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.04.08>
8. He Y., Liu X., Qin F., Xie J. (2012) Rectifying control of wire diameter during dieless drawing by a deformation measuring method of interframe displacement. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(7), 615–621.
9. Supriadi S., Furushima T., Manabe K. (2013) Real-time monitoring system of dieless bellows forming using machine vision. *Advanced materials research*, 789, 429–435.
10. Mashiwa N., Furushima T., Manabe K. (2017) Novel non-contact evaluation of strain distribution using digital image correlation with laser speckle pattern of low carbon steel sheet. *Procedia Engineering*, 184, 16–21.

11. Milenin A., Kustra P., Du P. et al. (2018) Computer aided design of the laser dieless drawing process of tubes from magnesium alloy with take into account ductility of the material. *Procedia Manufacturing*, **15**, 302–310.
12. Jafari H. (2013) *Thermo-mechanical investigation of die-less wiredrawing process*. University of British Columbia.
13. Tomashuk A., Sulima O., Porev V. (2018) Control of three main parameters of the wire in the four-dimensional printing process. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів. Ч. 1*. Харків, ХПІ, сс. 140–141.
14. Тихонов А.С., Герасимов А.П., Прохорова И.И. (1981) *Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении*. Москва, Машиностроение.
15. Ferreira M.A., Luersen M.A., Borges P.C. (2012) Nickel-titanium alloys: a systematic review. Dental press. *Journal of orthodontics*, **17(3)**, 71–82.
16. Tomashuk A. (2018) Device for monitoring the temperature and diameter of an extended cylindrical object in the high-temperature manufacturing process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **450**, 032018.
17. Ландсберг Г.С. (2003) *Оптика*. Москва, ФИЗМАТЛИТ.
18. Порев В.А. (2002) *Телевізійна пірометрія*. Київ, АВЕРС.
19. Порев В.А., Томашук О.С. (2015) Додаткові похибки вимірювання температури в телевізійній пірометрії. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, НТУ НГ, **2(35)**, 12–16.
20. Gulyaev I.P., Dolmatov A.V. (2018) Spectral brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions. *International journal of heat and mass transfer*, **116**, 1016–1025.
21. Гонсалес Р.С., Вудс Р.С. (2012) *Цифровая обработка изображений*. Москва, Техносфера.
- of electron beam crucible-less zone melting. *Ibid.*, **11**, 71–77 [in Ukrainian].
7. Porev, V.A., Tomashuk, A.S. (2017) Control of parameters of heated wire in process of drawing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 52–55. <https://doi.org/10.15407/tdnk2017.04.08>
8. He, Y., Liu, X., Qin, F., Xie, J. (2012) Rectifying control of wire diameter during dieless drawing by a deformation measuring method of interframe displacement. *Int. J. of Minerals, Metallurgy and Materials*, **19(7)**, 615–621.
9. Supriadi, S., Furushima, T., Manabe, K. (2013) Real-time monitoring system of dieless bellows forming using machine vision. *Advanced Materials Research*, **789**, 429–435.
10. Mashiwa, N., Furushima, T., Manabe, K. (2017) Novel non-contact evaluation of strain distribution using digital image correlation with laser speckle pattern of low carbon steel sheet. *Procedia Engineering*, **184**, 16–21.
11. Milenin A., Kustra P., Du, P. et al. (2018) Computer aided design of the laser dieless drawing process of tubes from magnesium alloy with take into account ductility of the material. *Procedia Manufacturing*, **15**, 302–310.
12. Jafari, H. (2013) *Thermo-mechanical investigation of die-less wiredrawing process*. University of British Columbia.
13. Tomashuk, A., Sulima, O., Porev, V. (2018) Control of three main parameters of the wire in the four-dimensional printing process. *In: Proc. of 12th Int. Sci.-Pract. Conf. of Undergraduates and Postgraduates*. Pt 1. Kharkov, KhPI, 140-141.
14. Tikhonov, A.S., Gerasimov, A.P., Prokhorova, I.I. (1981) *Application of shape memory effect in modern mechanical engineering*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
15. Ferreira, M.A., Luersen, M.A., Borges, P.C. (2012) Nickel-titanium alloys: A systematic review. Dental press. *J. of Orthodontics*, **17(3)**, 71–82.
16. Tomashuk, A. (2018) Device for monitoring the temperature and diameter of an extended cylindrical object in the high-temperature manufacturing process. *IOP Conference Series: Materials Sci. and Engineering*, **450**, 032018.
17. Landsberg, G.S. (2003) *Optics*. Moscow, FIZMATLIT [in Russian].
18. Porev, V.A. (2002) *Television pyrometry*. Kyiv, AVERS [in Ukrainian].
19. Porev, V.A., Tomashuk, O.S. (2015) Additional errors of temperature measurement in television pyrometry. *In: Methods and equipment for quality control*. Ivano-Frankivsk, NTU NG, **2(35)**, 12-16 [in Ukrainian].
20. Gulyaev, I.P., Dolmatov, A.V. (2018) Spectral brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **116**, 1016–1025.
21. Gonsales, R.S., Vuds, R.S. (2012) *Digital image processing*. Moscow, Tekhnosfera [in Russian].

References

ВИМІР ТЕМПЕРАТУРИ ТА ДІАМЕТРА ДІЛЯНКИ НАГРІТОГО ВИРОБУ

В.А. Порев, О.С. Томашук

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: tomashuk.alexander@gmail.com

В процесі високотемпературного виготовлення або обробки циліндричного виробу необхідно отримувати інформацію щодо його енергетичних та геометричних параметрів. Для досягнення поставленої мети найбільш вдалим рішенням стане використання оптичних методів та методів цифрової обробки зображень. Оптичні методи, які засновані на законах геометричної оптики, заломлення, інтерференції та дифракції, дозволяють проводити вимірювання необхідних параметрів з високою точністю, що дозволяє удосконалювати якість виробу що виготовляється. В роботі описані математична модель та конструкція оптичного пристрою для проведення процедур вимірювань діаметра і температури з високою точністю. Методи дозволяють виробляти контроль діаметра та температури на розфокусованому зображенні. Результати розробки оптичного пристрою прив'язані до математичної моделі бесфільерного волочиння дроту, як одного з високотемпературних процесів. Результати калібрування пристрою за температурною шкалою показали деякі переваги використання запропонованого безконтактного методу над контактним – термометра з термопарою. Запропоновано підхід для вимірювання температури поверхні виробу, який рухається з деякою швидкістю, яка дорівнює швидкості формування зображення. Даний підхід заснований на методах цифрової обробки зображень. Бібліогр. 21, рис. 6.

Ключові слова: неруйнівний контроль, оптика, дифракція, температура, діаметр, ефект пам'яті форми, виробничий процес

MEASUREMENT OF TEMPERATURE AND DIAMETER OF A HEATED ITEM SECTION

V.A.Porev, A.S.Tomashuk

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine.
E-mail: tomashuk.alexander@gmail.com

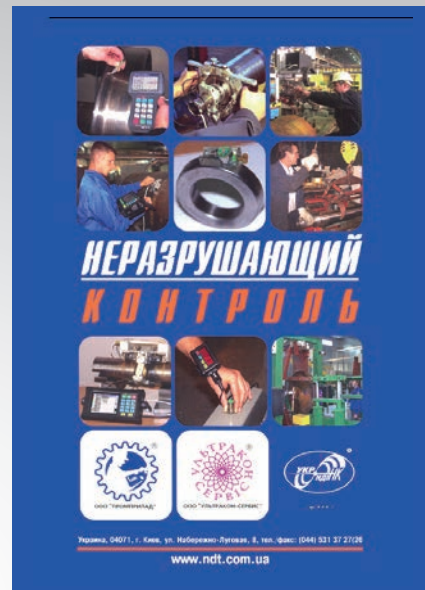
During high-temperature manufacture or treatment of a cylindrical item, it is necessary to obtain information about its energy and geometrical parameters. Application of optical and digital image processing methods will be the most successful solution to achieve the set goal. Optical methods, which are based on the laws of geometrical optics, refraction, interference and diffraction, allow measuring the required parameters with a high accuracy that enables improving the manufactured item quality. The paper describes the mathematical model and design of an optical device for conducting the procedures of measurement of the diameter and temperature with a high accuracy. These methods allow controlling the diameter and temperature on a defocused image. The results of development of the optical device are tied to the mathematical model of dieless drawing of wire, as one of the high-temperature processes. The results of device calibration by temperature showed some advantages of application of the proposed contactless method over the contact one – a thermometer with a thermocouple. An approach is proposed for measurement of surface temperature of an item, moving at a certain speed, which is equal to that of image forming speed. This approach is based on the methods of digital image processing. 21 Ref., 6 Fig.

Keywords: nondestructive testing, optics, diffraction, temperature, diameter, shape-memory effect, production process.

Поступила в редакцию
21.03.2019

КАТАЛОГ ПРОДУКЦИИ группы компаний ОКО

- Ультразвуковой дефектоскоп SONOCON B
- Ультразвуковой дефектоскоп УД 3-71
- Ультразвуковой дефектоскоп УД 4-76
- Ультразвуковой дефектоскоп железнодорожная версия УД4-94-ОКО-01
- Система USC TOFD 2.10 PRO
- Ультразвуковые толщиномеры ТУЗ-1, ТУЗ-2 и ТУЗ-5
- Ультразвуковой толщиномер UTG-8
- Преобразователи ультразвуковые к дефектоскопам и толщиномерам
- Ультразвуковые и вихретоковые стандартные образцы
- Вихретоковый аритмный дефектоскоп EDDYCON ВД3-81
- Вихретоковый дефектоскоп EDDYCON C
- Вихретоковый дефектоскоп EDDYCON D
- Вихретоковый дефектоскоп ВД3-71 НК-IVY
- Вихретоковый дефектоскоп ВД-131 НД специализированный
- Вихретоковые серийные преобразователи
- Магнитные дефектоскопы УМПК-2000, УниМаг-01, МД-4К, МД-4КМ
- Серия ультразвуковых дефектоскопов для контроля ж/д пути и сварных стыков рельс УДС2-73МР, УДС2-77, УД3-71
- Динамические твердомеры ТДМ-1 и ТДМ-2
- Установка измерения скорости распространения ультразвука УИСУ-01
- Серия установок магнитопорошкового контроля УМПК-1, 2, 3, 5
- Установка магнитопорошкового контроля муфт УМПК-4М, 8
- Установка мокрого магнитопорошкового контроля ж/д осей УМПК ОСЬ-38
- Стенд магнитопорошкового контроля крупногабаритных авиационных деталей УМПК-39
- Установка автоматизированная для комплексного неразрушающего контроля колесных пар вагонов ЧНК КП-8



- Установка ультразвуковой и вихретоковой дефектоскопии ж/д осей при выпуске из производства ЧНК «ОСЬ-3»
- Система автоматизированного ультразвукового иммерсионного контроля ж/д осей «УНИСКАН-Луч ОСЬ-4»
- Система автоматизированного ультразвукового контроля концов труб «САУЗК «УНИСКАН-Луч» КТ-7»
- Система автоматизированного неразрушающего контроля тела трубы Т-18 и Т-18ВТ
- Система автоматизированного иммерсионного ультразвукового контроля колес ж/д транспорта «УЗ-ЮГ»
- Система автоматизированного ультразвукового контроля продольных сварных швов труб САУЗК ПШ-11 ERW
- Орган по сертификации персонала в области НК технических объектов железнодорожного транспорта УкрНИИНК
- Аттестационный центр неразрушающего контроля на базе ООО «Промприлад»
- Учебный центр ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС»

ПОРІВНЯННЯ ЧУТЛИВОСТІ МОДЕЛЕЙ ЗВИЧАЙНИХ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ В РАМКАХ ЗАДАЧ ЦИВІЛЬНОГО РОЗМІНУВАННЯ

С.А. Овчарук, В.Г. Баженов

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: sa.ovcharuk@gmail.com

У статті розглянуто сучасний стан проблеми цивільного розмінування вибухових зарядів та пристроїв з мінімальним або відсутнім вмістом металів, суть та потенційні можливості застосування електроємнісного методу за даним напрямком, переваги використання диференціального електроємнісного перетворювача, представлено та проаналізовано результати комп'ютерного моделювання порівняння чутливості ряду диференціальних та звичайних електроємнісних перетворювачів до наявності нерівномірності у вигляді моделі міни в сканованій ділянці простору. Бібліогр. 20, рис. 11.

Ключові слова: електроємнісний метод, диференціальний електроємнісний перетворювач, комп'ютерне моделювання, цивільне розмінування

На сьогодні гостро стоїть питання швидкого, безпечного та ефективного розмінування територій від наслідків бойових дій. Найбільш розповсюдженим інструментом для виявлення наземних мін є металодетектор. Однак моделі багатьох мін вироблені з мінімальним або нульовим використанням металу, що ускладнює або унеможлиблює їх детектування цим методом. Як альтернатива металодетекторам у таких випадках часто використовується технологія з використанням георадару (англ. GPR – Ground Penetrating Radar). Ця технологія полягає у випромінюванні електромагнітних хвиль високої частоти (одиниці гігагерц) та реєстрації відбитого сигналу. Даний метод дозволяє отримати результати сканування відносно високої точності, однак, його недоліками є складність інтерпретації отриманих результатів, особливо результатів сканування приповерхневого шару ґрунту без попередньої підготовки, значний вплив вологості та структури ґрунту на ефективність використання технології, та висока вартість [1, 2].

Найбільш ефективними засобами розмінування вважаються комбіновані системи, що працюють з використанням обох технологій – металодетектора та GPR [1, 2]. Такі системи здатні сканувати ґрунт за допомогою цих двох методів як одночасно, так і окремо. Однак ті обмеження, що накладаються на використання GPR для знаходження вибухових пристроїв з відсутнім та малим вмістом металів, знижують достовірність сканування та підвищують ризики, пов'язані зі здоров'ям та життям людей, тому знаходження допоміжних або альтернативних методів для цієї задачі є актуальним. Альтернативним або допоміжним до технології GPR для цих задач може стати електроємнісний метод.

© С.А. Овчарук, В.Г. Баженов, 2019

Електроємнісний метод. Суть електроємнісного методу полягає у реєстрації зміни просторового розподілу електричного поля, що проходить крізь об'єкт контролю (ОК). Ці зміни визначаються шляхом вимірювання електричного заряду, що індукується цим полем на вимірювальному електроді перетворювача. Наявність нерівномірності в матеріалі ОК у вигляді певного об'єму (тіла) з діелектричною проникністю, що відрізняється від діелектричної проникності матеріалу ОК, викличуть зміни в просторовому розподілі поля, що, в свою чергу, спричинить зміну величини індукованого заряду на електроді перетворювача. Оскільки частота зміни поля мала (зазвичай до одиниць мегагерц), магнітною складовою поля можна знехтувати, тому таке поле називають квазі-електростатичним [3, 4].

Типовий електроємнісний перетворювач для одностороннього сканування має вигляд розгорнутого плоского конденсатора, між пластинами якого знаходиться ОК (рис. 1). Зміна сумарної діелектричної проникності середовища між пластинками цього конденсатора за рахунок наявності нерівномірності в зоні сканування може також розглядатися як зміна електричної ємності конденсатора, тому метод називають електроємнісним (або просто ємнісним).

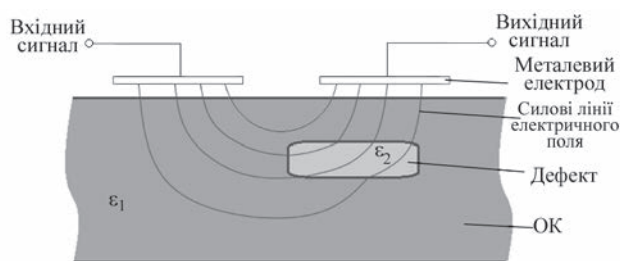


Рис. 1. Схематичне зображення процесу вимірювання електроємнісним методом з використанням планарного (плоского) перетворювача

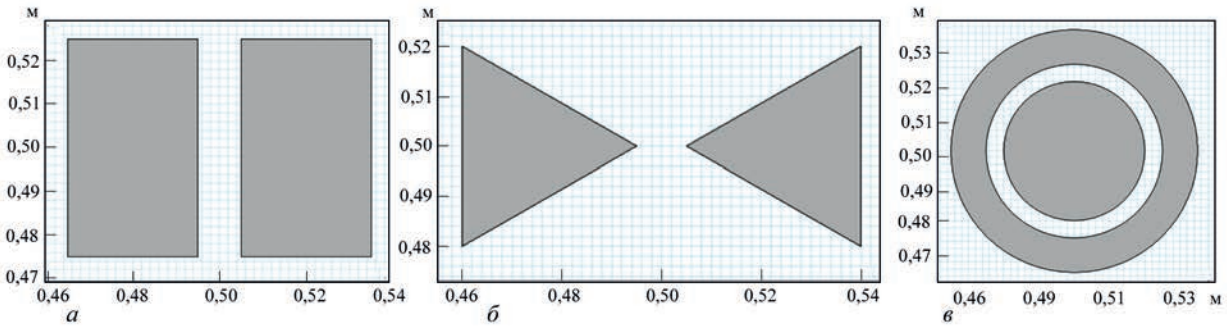


Рис. 2. Форми та розміри звичайних перетворювачів, що використовувались на першому етапі моделювань (опис а-в див. у тексті)

Таким чином, вимірюючи величину зміни індукованого електричного заряду на вимірювальній обкладці такого перетворювача можливо досліджувати ОК на наявність нерівномірностей (дефектів) у його структурі, однак, лише якщо ці рівномірності характеризуються діелектричною проникністю, відмінною від матеріалу ОК. Для задач розмінування ОК – є грунт, а дефектами (нерівномірностями) є вибухові пристрої (міни).

Переваги використання диференціального методу. На сьогодні існує ряд проведених досліджень та патентів, що стосуються підвищення ефективності електроємнісного методу сканування з використанням плоского перетворювача та його застосування у різних сферах діяльності людини [3–18]. Однак в дослідженнях, що стосуються підвищення ефективності застосування методу в рамках цивільного розмінування [17, 18], не приділялась увага перспективі використання диференціальної схеми вимірювання та перетворювача відповідної конструкції, та вплив такого підходу на результати сканування.

Вимірювання електричного заряду при реалізації електроємнісного методу потребує використання підсилювачів електричного заряду, які, як відомо, повинні мати дуже високий вхідний опір, а це, в свою чергу, значно знижує їх завадостійкість від електричної складової електромагнітних завад. Основною перевагою використання диференціального підходу є можливість значно знизити вплив цих завад на результати вимірювання за рахунок їх взаємокомпенсації на етапі диференціального складання сигналів з двох вимірювальних

електродів, що, в свою чергу, зменшить вірогідність виникнення хибних результатів сканування.

Математична модель. З метою оцінки величини зміни первинного параметру перетворювача – електричної ємності між електродами, та порівняння реакції до наявності нерівномірності в зоні чутливості перетворювачів різних форм, було проведено ряд комп’ютерних моделювань та отримано результати, що показують різницю між результатами сканування звичайним та диференціальним перетворювачем.

Моделювання проводились у два етапи – на першому етапі моделювання проводились для звичайних перетворювачів, зображених на рис. 2. На другому етапі – для диференціальних перетворювачів, зображених на рис. 3.

Форми перетворювачів були обрані на основі результатів проведених досліджень [3–7].

Тіло, що підлягає визначенню, є циліндр діаметром 90 мм та висотою 30 мм. Розміри та форма були підібрані у відповідність до розмірів реальних об’єктів – протипіхотних мін з мінімальним вмістом металу (наприклад, РМА-3 – 111×40 мм, VS-МК2 – 90×32 мм [19]). Програмне забезпечення, що використовувалось для моделювання – Comsol Multiphysics (COMSOL Co., Ltd.), модуль AC/DC.

Моделювання проводились для глибин залягання циліндра 1 та 2 см, відносна діелектрична стала середовища (грунту), в якому знаходиться циліндр, прийнято як $\epsilon = 10$ (що відповідає грунту з об’ємним коефіцієнтом вологості близько 20% [20]), матеріалу тіла самого циліндра $\epsilon = 2$ (що

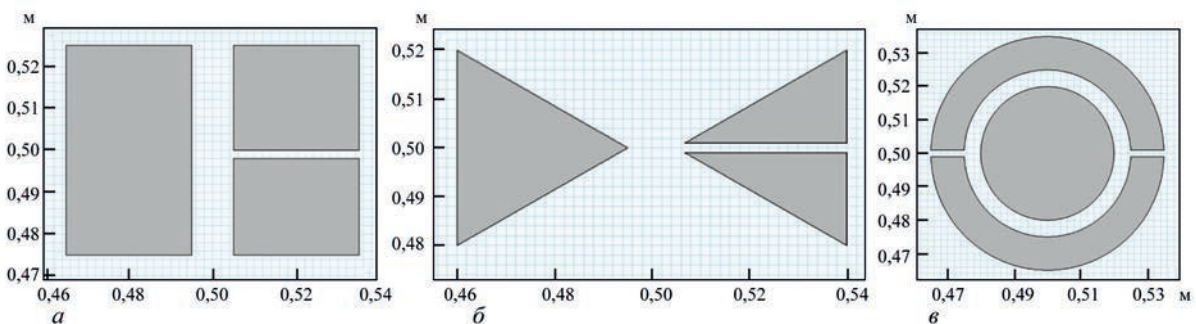


Рис. 3. Форми та розміри диференціальних перетворювачів, що використовувались на другому етапі моделювань (опис а-в див. у тексті)

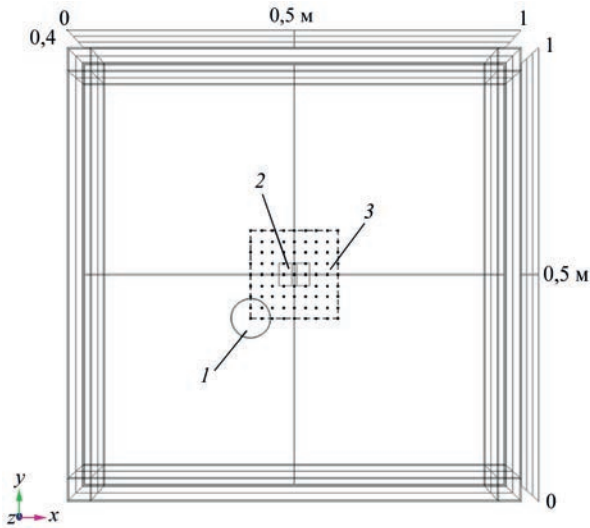


Рис. 4. Геометричні розміри та вигляд моделі (1 – циліндр; 2 – перетворювач; 3 – область сканування)

відповідає приблизному значенню відносної діелектричної сталої розповсюджених пластиків, з яких виготовляється корпус протипіхотних мін з мінімальним вмістом металу). Для середовища в якому розташовано перетворювач (повітря) $\epsilon = 1$. Відстань від перетворювача до поверхні ґрунту у першому етапі становить 1 см, у другому – 0,5 см. Загальні фізичні розміри моделі складають $1 \times 1 \times 0,6$ м. Геометрія моделі зображена на рис. 4. Шар матеріалу, що відповідає шару ґрун-

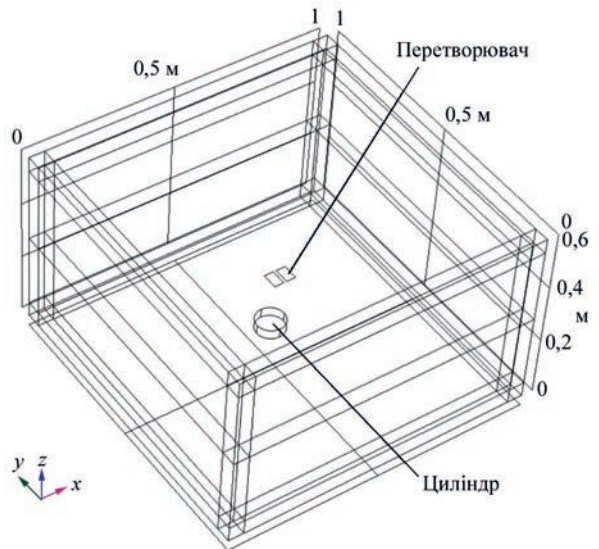


Рис. 5. Область сканування, кожна точка відповідає положенню центра циліндра для кожного із проведених обчислень ємності відповідного перетворювача

ту, має висоту 0,3 м, шар матеріалу, що відповідає шару повітря, також має висоту 0,3 м. Перетворювач розміщено по центру моделі (по осям x та y), координата u положення перетворювача 0,31 м для першого етапу моделювання, та 0,305 м – для другого. Математична модель розраховувалась методом скінченних елементів (тетраєдрів), мінімальний розмір елемента 0,0005 м, максимальний – 0,035 м.

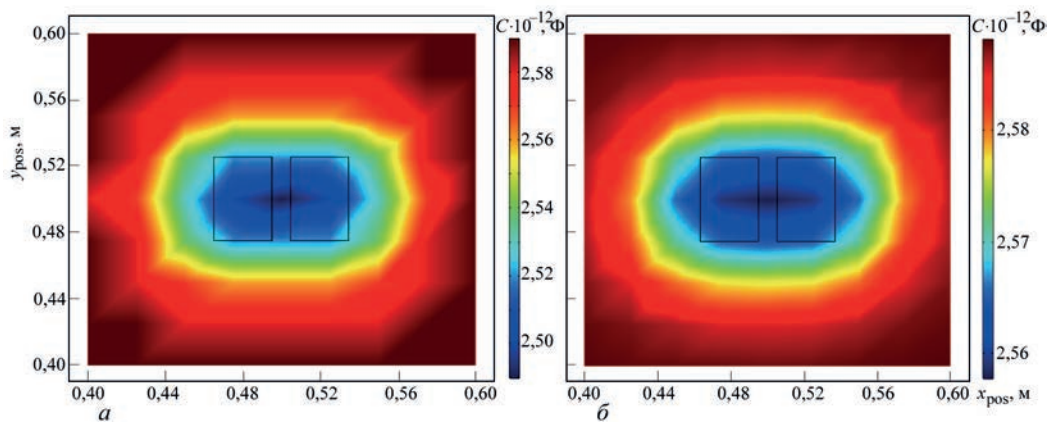


Рис. 6. Результати моделювання для перетворювача, зображеного на рис. 2, а: а – глибина залягання циліндра – 1 см; б – 2

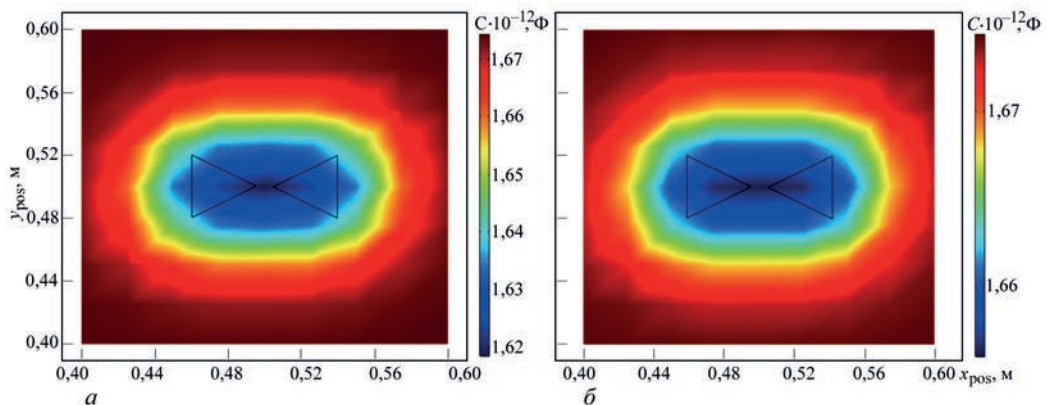


Рис. 7. Результати моделювання для перетворювача, зображеного на рис. 2, б: а – глибина залягання циліндра – 1 см; б – 2

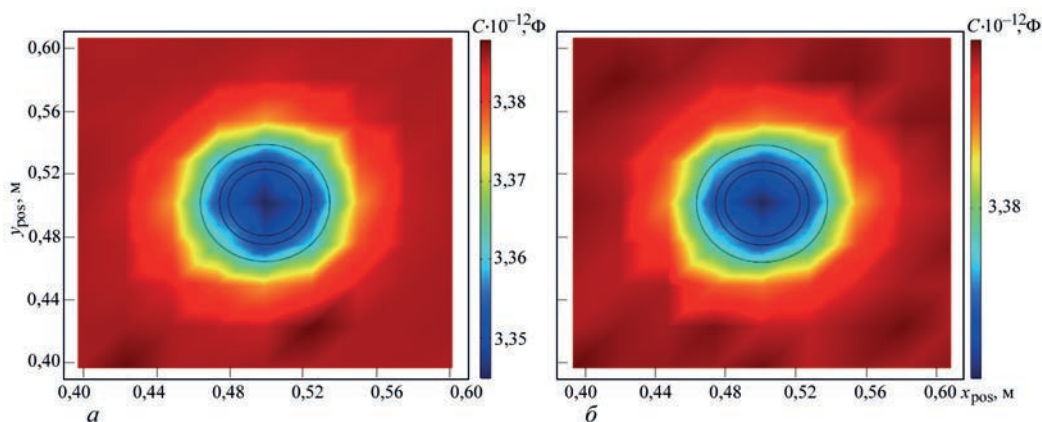


Рис. 8. Результати моделювання для перетворювача, зображеного на рис. 2, *а* – глибина залягання циліндра – 1 см; *б* – 2

Сканування відбувалось з покроковою зміною положення центра циліндра відносно перетворювача. Таким чином, одне сканування складається з почергових розрахунків моделі, кількість яких відповідає кількості кроків зміни положення центра циліндра. Мінімальна кількість кроків в проведених моделюваннях складає 55, максимальна – 143. При положенні центра циліндра у площині x - y на відстані близько 10 см від центру розташування перетворювачів практично ніякого впливу на величину ємності перетворювачів не спостерігалось, тому область сканування була обмежена до розмірів 20×20 см (рис. 5).

Для диференціальних перетворювачів кожному положенню центра циліндра (кожній точці на рис. 5) відповідає диференційоване значення ємності. Тобто, для перетворювача на рис. 3, *а*, на кожному кроці зміни положення циліндра були розраховані ємності між головним електродом (зліва) та кожним із менших електродів, результат розраховувався як модуль різниці між цими двома значеннями ємностей. Аналогічно і для перетворювачів на рис. 3, *б*, *в*.

На зображеннях результатів моделювання (рис. 6–11) представлено кольорові графіки, де вісь абсцис (x_{pos} – « x position») відповідає поло-

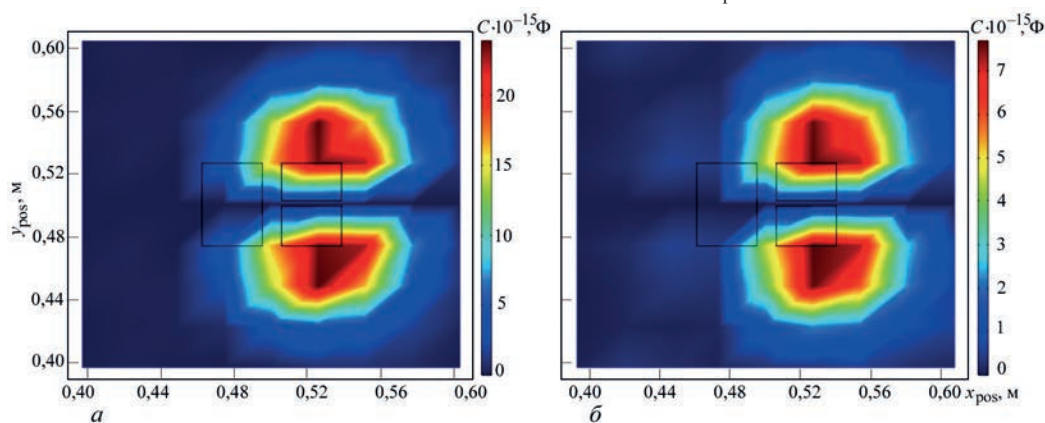


Рис. 9. Результати моделювання для диференціального перетворювача, зображеного на рис. 3, *а* – глибина залягання циліндра – 1 см; *б* – 2

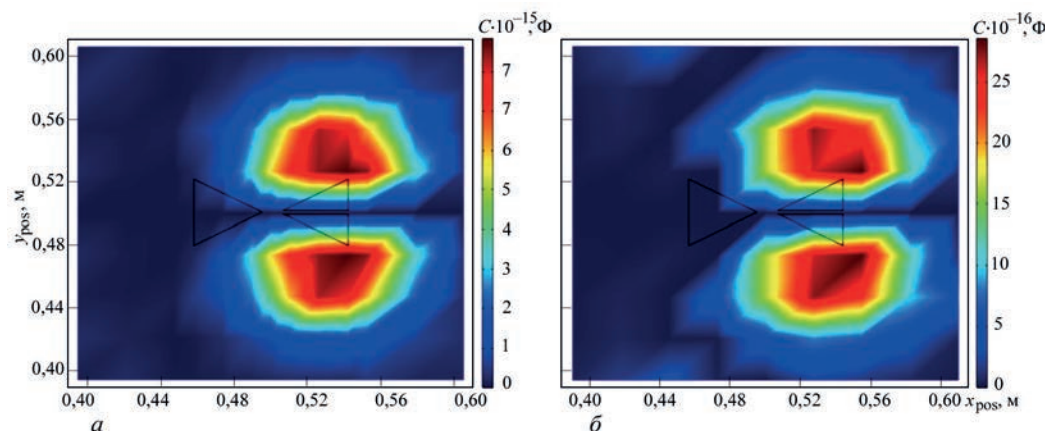


Рис. 10. Результати моделювання для диференціального перетворювача, зображеного на рис. 3, *б*: *а* – глибина залягання циліндра – 1 см; *б* – 2

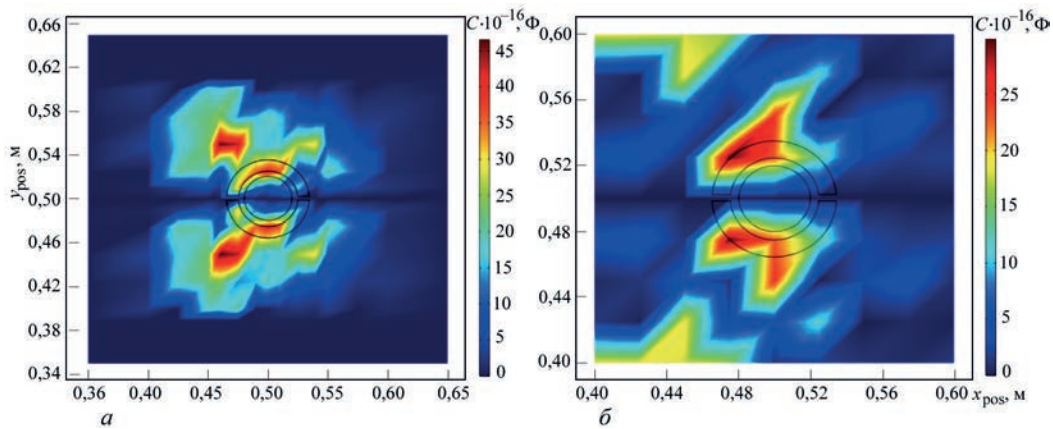


Рис. 11. Результати моделювання для диференціального перетворювача, зображеного на рис. 3, в: *a* – глибина залягання циліндра – 1 см; *б* – 2

женню центра циліндра по вісі x (рис. 4), вісь ординат (y_{pos} – « y position») відповідає положенню центра циліндра по вісі y (рис. 4), а відповідним кольором (згідно з кольоровою діаграмою справа від графіка) позначено величину ємності перетворювача для кожного із положень циліндра. Таким чином, рис. 6–11 практично є C -сканами чутливості перетворювачів до наявності нерівномірності (циліндра) в просторі під перетворювачем. Для кожного із наведених зображень було застосовано функцію згладжування для переходу від дискретного до неперервного формату зображення.

Результати моделювання. Зображення графіків етапу моделювань для звичайних перетворювачів, зображених на рис. 2, мають вигляд, представлений на рис. 6–8. За результатами цього етапу моделювань, максимальна відносна величина зміни ємності відповідає перетворювачу рис. 2, *a*: для глибини залягання циліндра 1 см становить 3,8 %, або 0,1 пФ (рис. 6, *a*), для глибини 2 см – 1,2 %, або 0,03 пФ (рис. 6, *б*). Найменшу зміну величини ємності при наявності циліндра показав перетворювач, зображений на рис. 2, *в* (графіки на рис. 8). Перетворювач з трикутною формою електродів показав проміжний результат між двома іншими перетворювачами (рис. 7).

Результати моделювання для диференціальних перетворювачів на рис. 3, зображено на рис. 9–11. Як видно із зображень, найкращі результати показує перетворювач рис. 3, *a*: для глибини залягання циліндра 1 см максимальна величина диференційованого значення електричної ємності складає 0,024 пФ (рис. 9, *a*), для глибини 2 см – 0,007 пФ (рис. 9, *б*), однак, у порівнянні із результатами першого етапу моделювання для звичайних перетворювачів ці величини є практично на порядок меншими. Найгірші результати на цьому етапі – у перетворювача на рис. 3, *в* – як видно з рис. 11, максимальна величина зміни диференційованого значення електричної ємності практично співрозмірна із величиною похиб-

ки, тому зображення графіків для цього перетворювача не дають точної картини, що нагадувала б певну форму зон чутливості перетворювача, що відповідали формі його електродів.

Висновки

Проведені моделювання дали змогу оцінити різницю між результатами сканування звичайними та диференціальними електроємнісними перетворювачами, та величину зміни ємності перетворювачів з трьома різними формами електродів.

Результати показують, що найбільш ефективними є перетворювачі з прямокутною формою електродів (рис. 2, *a*; 3, *a*), при наявності циліндра у зоні чутливості зміна величини ємності для таких перетворювачів була найвищою. Найменш ефективними виявились перетворювачі з округлою формою електродів (рис. 2, *в*; 3, *в*), особливо диференціальний перетворювач.

При порівнянні результатів моделювання для диференціальних перетворювачів спостерігається горизонтальна полоса нульових значень ємності при $y_{\text{pos}} = 0,5$ м для усіх значень x_{pos} . Ця полоса відповідає лінії симетричності диференціальних електродів перетворювачів, тому є зрозумілим, що при положенні циліндра рівно посередині між цими електродами сумарне різницеве значення ємності між ними дорівнюватиме нулю.

Абсолютні значення зміни ємності для диференціальних перетворювачів практично на порядок нижчі, ніж для звичайних. Це означає, що побудова електричної схеми вимірювання для таких перетворювачів буде ускладнена реалізацією ефективних засобів компенсації паразитної ємності, високими вимогами до заводостійкості елементів та вхідного імпедансу каскаду підсилення сигналу з вимірювальних електродів. Тому в наступних дослідженнях планується провести ряд моделювань з вивчення методів підвищення величини зміни ємності перетворювачів.

Враховуючи також те, що для електроємнісного методу використовуються відносно низькі частоти корисного сигналу, основними джерелами завад є завади від електричної мережі живлення. Тому застосування диференціального підходу має зміст в умовах підвищеної зашумленості середовища зазначеними електромагнітними завадами. Для зручності, зміну звичайного режиму вимірювання на диференціальний (і навпаки) без заміни перетворювача можливо забезпечити застосовуючи відповідну схему вимірювання, що здатна працювати в кожному із режимів для одного і того ж перетворювача з розділними вимірювальними електродами. Закриваючи електричний контакт між цими електродами, схема переходить у звичайний режим, розкриваючи – у диференціальний.

Наступними напрямками дослідження є оцінка впливу на величину ємності наявності ізоляційного шару перетворювача, його товщини та величини відносної діелектричної сталості матеріалу, впливу нерівномірності поверхні та вологості ґрунту. Також перспективним напрямком наступних досліджень є вивчення можливостей застосування комбінованого перетворювача, конструкція якого складається із матриці електродів різних розмірів та форм, що дасть змогу одночасного використання такого перетворювача у звичайному та диференціальному режимах, а також проведення сканування ділянки поверхні без необхідності переміщення перетворювача.

Список літератури/Reference

- Cardona, L., Jimenez, J., Vanegas, N. (2013) Landmine Detection Technologies to Face the Demining Problem in Antioquia. *Дина*, 81, 115–125.
- Tesfamariam G., Mali D. (2012) GPR Technologies for Landmine Detection. *International Journal of Computing Science and Communication Technologies*, 5, 1, 768–774.
- Diamond G.G., Hutchins D.A. (2006) A new capacitive imaging technique for NDT. *Proceedings of European Conference on NDT, Berlin, Germany*, pp. 1–8.
- Yin X., Hutchins D.A. (2010). Capacitive imaging technique for NDE. *Presented in the 37th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE) conference, San Diego, US*, pp. 18–23.
- Liu, Z., Liu, H. (2017). Experimenting Capacitive Sensing Technique for Structural Integrity Assessment. *Industrial Technology (ICIT) IEEE International conference, At Toronto, ON, Canada*.
- Xiaohui Hu Wuqiang Yang (2010). Planar capacitive sensors – designs and applications. *Sensor Review*, 30, 1, 24–39.
- Ye, Z., Banasiak, R., Soleimani, M. (2013). Planar array 3D electrical capacitive tomography. *Insight*, 55(12), 675–680
- Баженов В.Г., Івіцька Д.К., Грузін С.В. (2013) Удосконалений електростатичний метод неруйнівного контролю. *Методи та прилади контролю якості*, 2(31), 26–28.
- Bazhenov, V.G., Ivitska, D.K., Gruzin, S.V. (2013) Improved electrostatic method of nondestructive testing. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, 2(31), 26–28 [in Ukrainian].
- Баженов В.Г., Івіцька Д.К., Овчарук С.А., Муненко В.Л. (2015) *Електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю*. Україна Пат. на винахід 109357, МПК G 01 B 7/00, G 01 N 27/22. № 201404947.
- Bazhenov, V.G., Ivitska, D.K., Ovcharuk, S.A., Munenko, V.L. (2015) *Electrostatic amplitude-phase method of nondestructive testing*. Ukraine Pat. 109357, Int. Cl. G 01 B 7/00, G 01 N 27/22, No. 201404947 [in Ukrainian].
- Баженов В.Г., Івіцька Д.К., Овчарук С.А., Грузін С.В. (2016) *Електростатичний одноканальний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю*. Україна Пат. на винахід 112917, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22. № a201502540.
- Bazhenov, V.G., Ivitska, D.K., Ovcharuk, S.A., Gruzin, S.V. (2016) *Electrostatic one-channel amplitude-phase method of nondestructive testing*. Ukraine Pat. 112917, Int. Cl. G 01 B 7/00, G 01 B 7/287, G 01 N 27/22, No. a201502540 [in Ukrainian].
- Баженов В.Г., Івіцька Д.К. (2016) Електростатичний амплітудно-фазовий метод неруйнівного контролю з підвищеною завадостійкістю. *Матеріали 8-ї Національної науково-технічної конференції та виставки «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», Київ, 2016*.
- Bazhenov, V.G., Ivitska, D.K. (2016) Electrostatic amplitude-phase method of nondestructive testing with improved noise immunity. *In: Proc. of 8th National Sci.-Techn. Conf. and Exhibition on Nondestructive Testing and Techn. Diagnostics. Kyiv, 2016* [in Ukrainian].
- Ivitskiy I., Sivetskiy V., Bazhenov V., Ivitska D. (2017) Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 5(85), 4–9.
- Bazhenov V., Protasov A., Ivitskiy I., Ivitska D. (2017) Simulation of nanomodified polymers testing by the electric capacitive method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 5(88), 4–9.
- Баженов В.Г., Івицька Д.К. (2015) Первичные преобразователи для реализации электростатического метода неразрушающего контроля изделий. *Матеріали 8-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи»*. Київ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». pp. 47–48.
- Bazhenov, V.G., Ivitska, D.K. (2015) Primary transducers for realization of electrostatic method of nondestructive testing of products. *In: Proc. of 8th Int. Sci.-Techn. Conf. on Instrument Engineering – 2015*, 47–48.
- Bazhenov V., Ivitska D., Ivitskiy I.I. (2017) Transducers for realization of the electrostatic method of non-destructive testing of functional polymers. *NDT DAYS 2017. Sozopol*, pp. 128–129.
- Баженов В.Г., Івіцька Д.К. (2017) Особливості реалізації електростатичного амплітудно-фазового способу неруйнівного контролю. *Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи»*. Київ, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського».
- Bazhenov V., Ivitska D.K. (2017) Peculiarities of realization of electrostatic amplitude-phase method of nondestructive testing. *In: Proc. of 16th Int. Sci.-Techn. Conf. on Instrument Engineering: State of the Art and Perspectives. Kyiv, NTUU KPI* [in Ukrainian].
- Tholin-Chittenden, C., Soleimani, M. (2016) Planar Array ECT Sensor Design Optimisation. *Materials of 8th World Congress on Industrial Process Tomography, At Iguassu Falls, Brazil*.
- Tholin-Chittenden, C., Soleimani, M. (2017) Planar Array Capacitive Imaging Sensor Design Optimisation. *IEEE Sensors Journal*, 99, 1558–1748.
- (2002). Project Mimeva, Study of Generic Mine-Like Objects for R&D in Systems for Humanitarian Demining – Final Report. *Ispra*.
- Topp, G.C., Davis J.L., Annan A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574–582.

СРАВНЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛЕЙ ОБЫЧНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В РАМКАХ ЗАДАЧ ГРАЖДАНСКОГО РАЗМИНИРОВАНИЯ

С.А. Овчарук, В.Г. Баженов

НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: sa.ovcharuk@gmail.com

В статье рассмотрено современное состояние проблемы гражданского разминирования взрывных зарядов и устройств с минимальным или отсутствующим содержанием металлов, суть и потенциальные возможности применения электроемкостного метода по данному направлению, преимущества использования дифференциального электроемкостного преобразователя, представлены и проанализированы результаты компьютерного моделирования сравнения чувствительности ряда дифференциальных и обычных электроемкостных преобразователей к наличию неравномерности в виде модели мины в сканированном участке пространства. Библиогр. 20, рис. 11.

Ключевые слова: электроемкостный метод, дифференциальный электроемкостный преобразователь, компьютерное моделирование, гражданское разминирование

COMPARISON OF THE SENSITIVITY OF MODELS OF CONVENTIONAL AND DIFFERENTIAL CAPACITIVE TRANSDUCERS WITHIN HUMANITARIAN DEMINING TASKS

S.A. Ovcharuk, V.G. Bazhenov

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Prosp., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: sa.ovcharuk@gmail.com

The paper deals with the state-of-the-art of the problem of humanitarian demining of explosive charges and devices with minimum or no metal content, the essence and potential applications of electric capacitance method in this field, advantages of application of differential capacitive transducers. Results of computer modeling of comparison of sensitivity of a number of differential and conventional capacitive transducers to availability of non-uniformity in the form of a model of a mine in the scanned space area are presented and analyzed. 20 Ref., 11 Fig.

Keywords: electric capacitance method, differential capacitive transducer, computer modeling, humanitarian demining

Надійшла до редакції
04.03.2019

ХVІІІ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2019

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

19 - 22 листопада



ОРГАНІЗАТОР:

Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: Ексклюзивний медіа партнер:

ОБСЛУГОВУВАННЯ ДІЗЕЛІВНИКІВ

ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА

Технічний партнер:

RentMedia



Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"

☎ (044) 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕХИМИИ

М.А. Яременко, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Овсиенко, А.Е. Сараев

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

Проанализированы результаты периодического акустико-эмиссионного контроля пропановой колонны на протяжении трех лет. Показаны зарегистрированные зоны повышенной акустической активности на схеме объекта контроля. Даны рекомендации относительно проведения акустико-эмиссионного контроля объекта. Библиогр. 10, рис. 5.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, пропановая колонна, зоны повышенной акустико-эмиссионной активности

Успешное развитие теоретических разработок и экспериментальных исследований метода акустико-эмиссионного (АЭ) контроля, в частности, в ИЭС им. Е.О. Патона [1, 2], при диагностике и прогнозировании остаточного ресурса и предельно допустимых нагрузок в металлоконструкциях позволило создать ряд нормативных документов [3–5], расширяющих возможность применения на практике данного метода. Это повлекло за собой появления широкой гаммы приборов АЭ контроля, а также совершенствование их программного, математического и методического обеспечения [6–9].

Для проведения исследований и практических применений в ИЭС создана совместно с венгерскими специалистами современная аппаратура семейства ЕМА – приборы ЕМА-3 и ЕМА-4 (рис. 1).

Новые приборы имеют все необходимые функции для успешного решения поставленных задач:

– измерение всех стандартных параметров АЭ (время поступления и время нарастания сигнала, длительность, пиковая амплитуда и др.) и их сохранение;

- частотный анализ импульсов АЭ;
- корреляция между сигналами АЭ;
- определение координат источников сигналов АЭ;
- интерфейс с управляющим компьютером;
- тестовые режимы каналов АЭ.

Метод обработки сигналов АЭ – цифровой. Частота оцифровки сигналов АЭ – 16 МГц. Используются фиксированный и плавающий поро-

ги дискриминации импульсов АЭ. Провести более детальный анализ полученной информации позволяет и регистрация таких параметров, как энергия сигнала; временная задержка между импульсами, принятыми разными каналами локационной антенны; средняя частота сигнала в импульсе. Максимальная скорость обработки импульсов одного канала с записью в долговременную память позволяет сохранить и обработать весь объем поступающей с объекта контроля информации.

Разработка достоверных методов контроля и диагностирования промышленных объектов приобретает особенно важное значение в наше время, когда на предприятиях, по некоторым данным, отработало свой условный ресурс 30 лет более 70 % оборудования. Отдельные заводы построены более 60 лет назад (например, «Азот», г. Северодонецк), но продолжают эксплуатацию своего оборудования. Возрастает необходимость в применении методов, которые могли бы с определенной (заданной) вероятностью контролировать 100 % поверхности и объема материала конструкций, например, резервуаров вертикальных стальных, колонн синтеза, реакторов и др. Таким методом и является метод АЭ. Специалистами ИЭС постоянно проводятся работы по определению технического состояния как отдельных изделий, так и оборудования целых цехов на химических, нефтеперерабатывающих и теплоэнергетических предприятиях [10].



Рис. 1. Приборы ЕМА-3 (16-ти каналный) и ЕМА-4 (4-х и 16-ти каналные)

© М.А. Яременко, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Овсиенко, А.Е. Сараев, 2019



Рис. 2. Пропановая колонна П-К-1 (внешний вид и схема установки датчиков АЭ)

Проанализируем результаты применения разработанных приборов и технологии при проведении АЭ контроля пропановой колонны П-К-1 (далее – колонна, рис. 2). Данная колонна изготовлена в 1965 г. Избыточное давление в корпусе – 1,8 МПа, рабочая температура – до 150 °С. Внутренний диаметр – 1600 мм, толщина стенки – 18 мм (днища – 20 мм). Высота колонны 2740 мм (днища – 480 мм). Периодически на сосуде проводились ремонтные работы, а его дальнейшая эксплуатация разрешалась после проведения дополнительных расчетов и положительных результатов АЭ диагностики.

АЭ контроль колонны проводился на рабочих параметрах эксплуатации, при проведении гидроиспытаний, а также после выполнения ремонтных работ. Задача данных исследований – установление наличия дефектов в лакирующем слое и прочном корпусе.

После проведения предварительного тестирования объекта определены места установки датчиков АЭ, выбраны схемы пассивной звуколокации, проведена настройка системы ЕМА и уточнена методика проведения контроля. Места установки



Рис. 3. Установка датчиков и подготовка оборудования для проведения АЭ контроля

датчиков АЭ и размещения оборудования (рис. 3) подготовлены в соответствии с требованиями нормативных документов [2–4].

Периодический АЭ контроль данного объекта проводился на протяжении нескольких лет. Результаты АЭ контроля – выявленные зоны повышенной АЭ активности – наносились на схему объекта для последующего анализа и сравнения полученных результатов.

На рис. 4 приведены результаты АЭ контроля на протяжении 2013–2015 гг. Оранжевым и зеленым цветом указаны зоны АЭ активности по результатам контроля в 2013 г.; синим цветом – зоны АЭ активности по результатам контроля в 2014 г.; красным цветом – зоны АЭ активности по результатам контроля в 2015 г. (I квартал) и желтым цветом – зоны АЭ активности по результатам контроля 2015 г. (III квартал).

При таком представлении информации легко отслеживать динамику развития или появления новых зон повышенной акустической активности, которые затем подвергаются контролю другими методами. Принимается решение о необходимых

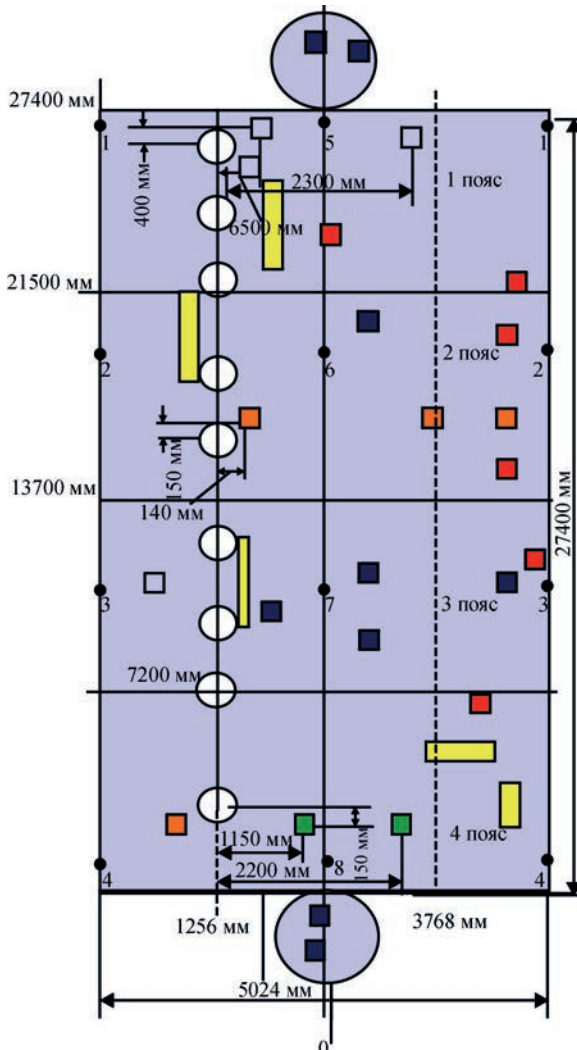


Рис. 4. Зоны повышенной АЭ активности, зарегистрированные при проведении АЭ контроля в 2013–2015 гг.

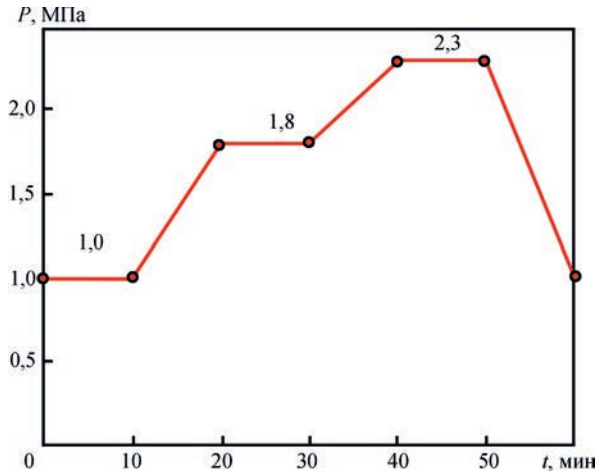


Рис. 5. Рекомендуемый график нагружения объекта при проведении гидроиспытания

объемах ремонта изделия во время останова изделия или условия его дальнейшей эксплуатации.

В случае выполнения ремонтных работ проводятся гидроиспытания с обязательным применением АЭ. Рекомендуемый график нагружения данного изделия приведен на рис. 5.

Применение АЭ контроля позволяет оценить качество выполненных ремонтных работ по устранению развивающихся дефектов, а также «зафиксировать» состояние изделия, создать «нулевой файл» перед вводом его в эксплуатацию, что значительно облегчит оценку состояния изделия в процессе его дальнейшей эксплуатации.

Выводы

1. Работы по оценке состояния металлоконструкций методом АЭ в процессе эксплуатации, ремонта и гидроиспытаний дают значительный объем полезной информации для принятия решений о дальнейшей эксплуатации высокотехнологического оборудования.

2. С целью снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций, обеспечения стабильной работы оборудования и минимизации потерь во время проведения ремонтных работ рекомендуем оснащение ответственных промышленных конструкций системами непрерывного АЭ мониторинга, позволяющими определять их остаточный ресурс и предельно допустимые нагрузки.

Список литературы

1. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: альбом*. Киев, Индпром.
2. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Опыт ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины в области акустико-эмиссионного контроля. Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 7–22.
3. (2003) ДСТУ 4227–2003. *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*. Київ, Держспоживстандарт України.
4. (2003) ДСТУ 4223–2003. *Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги*. Київ, Держспоживстандарт України.

5. (2012) СОУ 50.10–2012 *Настанови щодо проектування та впровадження систем акустико-емісійного контролю, діагностування та моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки*. Київ, ТК-78 «ТДНК».
6. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 16–22.
7. Недосека А.Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: монография. 4-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
8. Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Сулим Г.Т. (2007) *Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування*: монографія. Львів, СПОЛОМ.
9. Назарчук З.Т., Скальський В.Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник*: у 3 т. Т. 2: *Методологія акустико-емісійного діагностування*. Назарчук З.Т. (ред.). Київ, Наукова думка.
10. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А., Овсієнко М.А. (2018) Применении технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 34–41.

References

1. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) *Acoustic emission and life of structures: Album*. Kiev, Indprom [in Russian].
2. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) Experience of the E.O. Paton Welding Institute of the NAS of

- Ukraine in the field of acoustic-emission monitoring. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 7-22 [in Russian].
3. (2003) DSTU 4227-2003: *Guidelines on conducting acoustic emission diagnostics of higher high hazard facilities*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
4. (2003) DSTU 4223-2003: *Boilers, pressure vessels and pipelines. Technical diagnostics. General requirements*. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
5. (2012) SOU 50.10-2012: *Guidelines on design and introduction of systems for acoustic emission testing, diagnostics and monitoring of high hazard facilities*. Kyiv, TK-78 «TDNK» [in Ukrainian].
6. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 3, 16-22 [in Russian].
7. Nedoseka, A.Ya. (2008) *Fundamentals of design and diagnostics of welded structures*: Monography. 4th Ed. by B.E. Paton. Kiev, Indprom [in Russian].
8. Andrejkiv, O.E., Skalskyi, V.R., Sulym, G.T. (2007) *Theoretical fundamentals of acoustic emission method in fracture mechanics*: Monography. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
9. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) *Acoustic-emission diagnostics of structural elements: Sci.-Techn. manual*. In: 3 Vol. Vol.2: *Methodology of acoustic-emission diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
10. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2018) Application of technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 34-41 [in Russian].

МЕТОД АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ПРОВЕДЕННІ КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ НАФТОХІМІЇ

М.А. Яременко, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Овсієнко, А.Є. Сараєв

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

Проаналізовано результати періодичного акустико-емісійного контролю пропанової колони протягом трьох років. Показано зареєстровані зони підвищеної акустичної активності на схемі об'єкта контролю. Дано рекомендації щодо проведення акустико-емісійного контролю об'єкта. Бібліогр. 10, рис. 5.

Ключові слова: акустична емісія, пропанова колона, зони підвищеної акустико-емісійної активності

METHOD OF ACOUSTIC EMISSION AT TESTING OF PETROCHEMICAL FACILITIES

M.A. Yaremenko, A.Ya. Nedoseka, S.A. Nedoseka, M.A. Ovsienko, A.E. Saraev

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Results of periodic acoustic emission testing of a propane column for three years were analyzed. Recorded zones of higher acoustic activity on the scheme of the object of control are shown. Recommendations on conducting acoustic emission monitoring of the object of control are given. 10 Ref., 5 Fig.

Keywords: acoustic emission, propane column, zones of higher acoustic emission activity.

Поступила в редакцію 11.01.2019



ЖУРНАЛИ для професіоналів

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України (380-44) 200-8277 journal@paton.kiev.ua www.patonpublishinghouse.com

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ОПЛАВЛЕННЯМ РЕЙОК У СТАЦІОНАРНИХ І ПОЛЬОВИХ УМОВАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТА НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

С.І. Кучук-Яценко, П.М. Руденко, В.С. Гавриш, О.В. Дідковський, Є.В. Антіпін

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

Для контактної стикової зварювання рейок із термічно зміцненої сталі проведено дослідження та розроблено режими зварювання і технічні умови на процес. Відповідно до технічних умов розроблена дворівнева система, яка дозволяє підвищити точність контролю та керування процесом зварювання. На нижньому рівні в системі прямого цифрового керування контролем якості зварних з'єднань запропоновано алгоритм на основі «нечіткої» логіки, який враховує розмитість границь припустимих відхилень, розподіл параметрів процесу всередині допуску та взаємний вплив комбінації параметрів на показник якості стику. Контроль технічного стану устаткування здійснюється за даними тестової і функціональної діагностики. Для забезпечення стабільного енерговкладання розроблено обладнання стабілізації напруги на вході зварювального трансформатора при живленні від двофазної електричної мережі та перетворювач частоти і числа фаз для живлення від трифазної мережі. На верхньому рівні в діагностичному центрі Укрзалізниці здійснюється статистична обробка протоколів зварювання рейок, які надходять із підприємств галузі, для виявлення відхилень, які складно проконтролювати прямими вимірами, наприклад, незадовільне виконання допоміжних операцій з підготовки рейок перед зварюванням, відхилення фізико-хімічних властивостей металу рейок, незадовільне дотримання технологічних операцій зварником, незадовільні умови виробництва. Розроблені алгоритми і технічні засоби автоматизації пройшли експериментальну перевірку й можуть бути рекомендовані для подальшого впровадження у виробництво. Бібліогр. 3, табл. 1, рис. 14.

Ключеві слова: контактне стикове зварювання, термічно зміцнені залізничні рейки, система керування, контроль якості, контроль технічного стану обладнання, статистичний контроль

При контактному стиковому зварюванні рейок здійснюється контроль технологічних параметрів режиму з фіксацією їх комп'ютерною системою керування для кожного стику. Контроль якості перевіряється допусковим контролем на відхилення параметрів, обумовленим у технічних умовах (ТУ). Для підвищення надійності контролю після зварювання також здійснюється ультразвукова дефектоскопія стиків і періодично проводяться механічні випробування зварених зразків рейок і видається висновок про відповідність заданого технологічного режиму необхідній якості стику. Виробництво нових рейок з термічно зміцнених сталей поставило задачу розробки нових режимів зварювання, умов їх виконання та системи контролю і керування процесом.

З урахуванням можливостей існуючих систем керування контролем та регулювання процесом була розроблена система керування (рис. 1), яка, крім прямого цифрового керування зварювальним процесом, виконує наступні функції:

– прогнозування якості звареного стику за параметрами процесу по більш досконалих алгоритмах з можливістю залучення до прогнозування в особливих випадках кваліфікованих фахівців;

– контроль технічного стану зварювального устаткування, вироблення рекомендацій і планування технічного обслуговування його;

– виявлення і розпізнавання аварійних ситуацій для негайного втручання в технологічний процес;

– виявлення систематичних відхилень і трендів параметрів процесу зварювання, які можуть приводити до погіршення показників якості зварних з'єднань, розробка рекомендацій з корегування параметрів режиму зварювання.

При дослідженні процесу контактної зварювання сучасних марок термічно зміцнених залізничних рейок, зокрема, з киснево-конвертерної сталі марки К76Ф, було розроблено режими, що забезпечують високо концентрований нагрів при зварюванні та дозоване енерговкладання [1].

Для стабілізації енерговкладання в стик, що зварюється, були розроблені комп'ютерна система керування тиристорним контактором для живлення від однофазної (двофазної) силової мережі та трифазний перетворювач частоти і числа фаз (ПЧ) [2, 3]. Точність стабілізації напруги на вході зварювального трансформатора в обох випадках порядку 3 %. Крім стабілізації напруги, ПЧ дозволяє забезпечувати рівномірне завантаження кожної

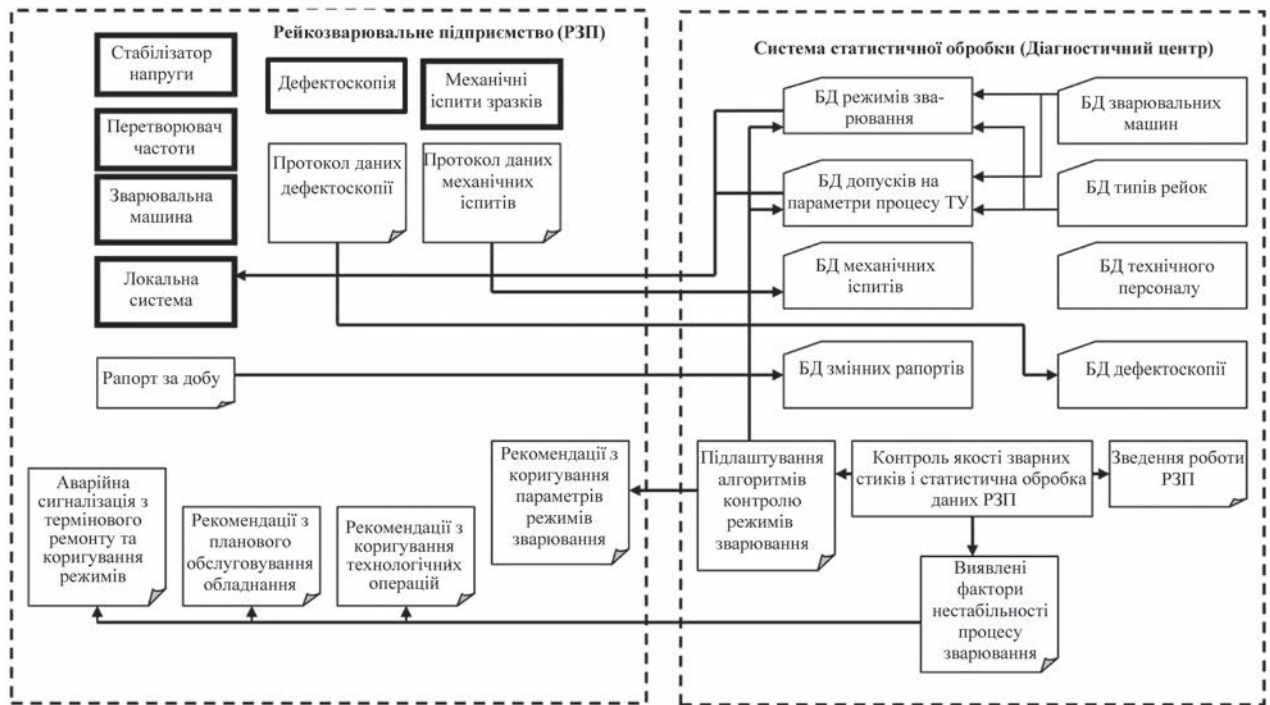


Рис. 1. Структурна схема дворівневої системи керування фази трифазної електричної мережі. При цьому струм у кожній фазі в середньому на 20 % нижче, ніж при живленні зварювальної машини від двофазної мережі. ПЧ пройшов дослідно-промислове випробування при зварюванні рейок на РЗП-5 і показав, що якість зварених при його використанні рейок повністю відповідає ТУ. Експериментально доведено, що застосування стабілізації напруги дозволяє відповідно до розроблених режимів зварювання з необхідною точністю забезпечувати енерговкладання в зварювальний стик, що є однією з основних умов забезпечення якості стиків рейок термічно зміцнених сталей.

Разом з режимами розроблено допуски на відхилення параметрів процесу (ТУ). Для підвищення надійності існуючого допускового контролю та прогнозування оцінки показника якості зварного стику (відповідність ТУ) було розроблено алгоритм контролю на основі «нечіткої» логіки. Основні недоліки існуючого допускового контролю в тому, що не враховується:

- значимість впливу окремих параметрів і комбінації параметрів на показник якості стику;
- розподіл параметрів процесу у середині допуску;
- розмитість границь допустимих відхилень.

З урахуванням зазначених недоліків для прогнозування умови відповідності показника якості зварного стику ТУ (руйнуючого зусилля при випробуванні стику на статичне навантаження і стріли прогину) було розроблено алгоритм контролю на основі «нечіткої» логіки, тому що через складність процесу стикового зварюван-

ня розробка аналітичної, статистичної або будь-якої іншої чисельної моделі не було можливим. Для врахування розмитості границь допустимих відхилень параметрів було використано перетворення величин відхилення параметрів процесу у середині наявних згідно з ТУ допусків до деякої безрозмірної величини – ступеня відповідності параметра ТУ (α). Ці функції перетворення (фазифікації), які можуть бути різної форми, обрані у вигляді трапеції (рис. 2). У такий спосіб у середині цього допуску ($X_{cp} \pm \Delta X/6$, де X_{cp} – середнє значення допуску, а ΔX – величина допуску) функція приналежності параметра ТУ дорівнює 1, а далі до границь допуску лінійно падає до нуля. На основі висновків технологів про якісний вплив параметрів на процес стикового зварювання побудовано логічні залежності, які враховують як взаємний вплив на процес, так і розташування параметрів у полі допуску (далі під терміном помилка розуміється відхилення параметра від середини допуску).

Оцінка якості зварювання здійснюється аналізом параметрів на трьох стадіях процесу: нагрів – формування температурного поля на торцях виробів, що зварюються; перехід від нагріву до осадки з підвищенням швидкості укорочення; осадка – формування з'єднання у твердій фазі. У результаті визначається ступінь істинності (або вірогідності) відповідності параметрів на цих етапах допускам ТУ й, отже, ймовірність одержання зварного стику, якість якого відповідає ТУ.

1. ЯКЩО негативна помилка $V_{оп}$, ТО велике нагрівання (перегрів) деталей.

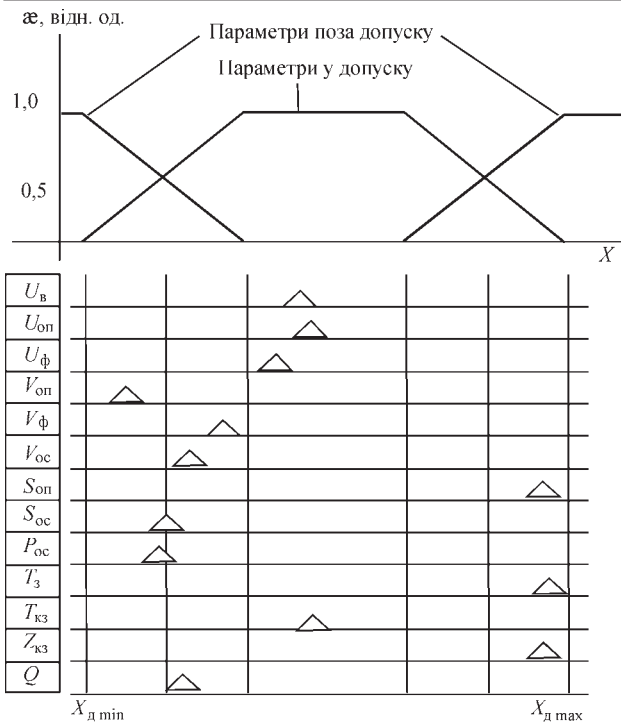


Рис. 2. Функція фазифікації параметрів процесу стикового зварювання для контролю якості зварних стиків ($U_B, U_{оп}, U_{ф}$ – середня напруга на вході зварювального трансформатора на першому етапі зварювання (зняття косини), другому (нагріву) та третьому (перехід від нагріву до осадки з підвищенням швидкості укорочення), відповідно; $V_{оп}, V_{ф}, V_{ос}$ – середня швидкість укорочення зварювальних рейок на другому, третьому етапах та під час осадки; $S_{оп}, S_{ос}$ – величина укорочення зварювальних рейок до осадки та під час осадки; $P_{ос}$ – тиск осадки; T_3 – час зварювання; $T_{кз}$ – час короткого замикання зварювального струму при переході від нагріву до осадки з підвищенням швидкості укорочення; $Z_{кз}$ – повний опір зварювальних рейок після осадки; Q – електрична енергія за час зварювання на вході зварювального трансформатора)

1а. ЯКЩО *позитивна* помилка Q ТА *негативна* помилка $S_{оп}$, ТО *велике* нагрівання (перегрів) деталей.

2. ЯКЩО *позитивна* помилка $V_{оп}$, ТО *мале* нагрівання (недогрів) деталей.

2а. ЯКЩО *негативна* помилка Q ТА *позитивна* помилка $S_{оп}$, ТО *мале* нагрівання (недогрів) деталей.

3. ЯКЩО *велике* нагрівання деталей АБО *мале* нагрівання деталей, ТО *незадовільне* температурне поле.

4. ЯКЩО *негативна* помилка $V_{ф}$ АБО помилка $U_{ф}$, ТО *незадовільний* поверхневий шар розплавленого металу на торцях рейок (можлива поява «матових плям» – дефекту структури металу пов’язаного з формуванням в металі легкоплавких плівок, які при кристалізації формуються з дрібних неметалевих включень) або не проварів.

5. ЯКЩО *велике* $T_{кз}$, ТО *незадовільний* поверхневий шар розплавленого металу на торцях рейок (можлива поява «матових плям») або непровар.

6. ЯКЩО *позитивна* помилка $S_{ос}$ ТА *позитивна* помилка $V_{ос}$, ТО *можливе* проковзування або перегрів зварювальних деталей.

7. ЯКЩО *негативна* помилка $S_{ос}$ ТА *негативна* помилка $V_{ос}$ АБО *можливе* проковзування або перегрів зварювальних деталей, ТО *незадовільне* формування з’єднання у твердій фазі.

8. ЯКЩО *незадовільне* температурне поле АБО *незадовільний* поверхневий шар розплавленого металу на торцях рейок АБО *незадовільне* формування з’єднання у твердій фазі, ТО *вище* ймовірність неякісного звареного стику.

Далі ці логічні вираження були перетворені за допомогою відомих правил до виду зручному для реалізації на ЕОМ.

Для контролю технічного стану зварювального устаткування використовується його контроль за даними тестових випробувань (тестова діагностика) і за даними точності відпрацювання параметрів режиму в процесі зварювання виробів (функціональна діагностика). Тестова діагностика включає два тести. Перший – це перевірка статичної й динамічної помилки роботи приводу подачі рухливої колони. При цьому величина статичної похибки (помилки між заданою й обмірюваною величиною для процесу, що встановився) і динамічної похибки (час установа заданого керуючого впливу) особливо важливі для процесу стикового зварювання. Ці величини в значній мірі визначають стійкість процесу зварювання, тому що вони визначають якість роботи регулятора зварювального струму, і точність завдання величини швидкості $V_{оп}$ і $V_{ф}$, які є параметрами, закладеними в ТУ на зварювання рейок.

Для оцінки статичної й динамічної похибки відпрацювання швидкості подачі рухливої ко-

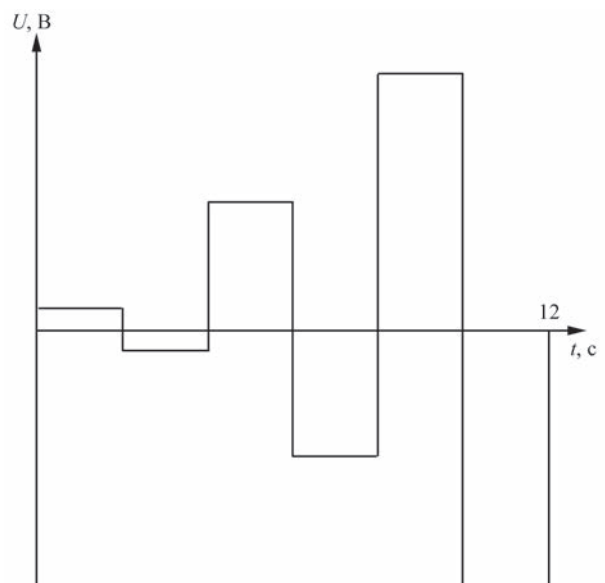


Рис. 3. Форма іспитового сигналу на вході блоку керування приводом подачі рухливої колони

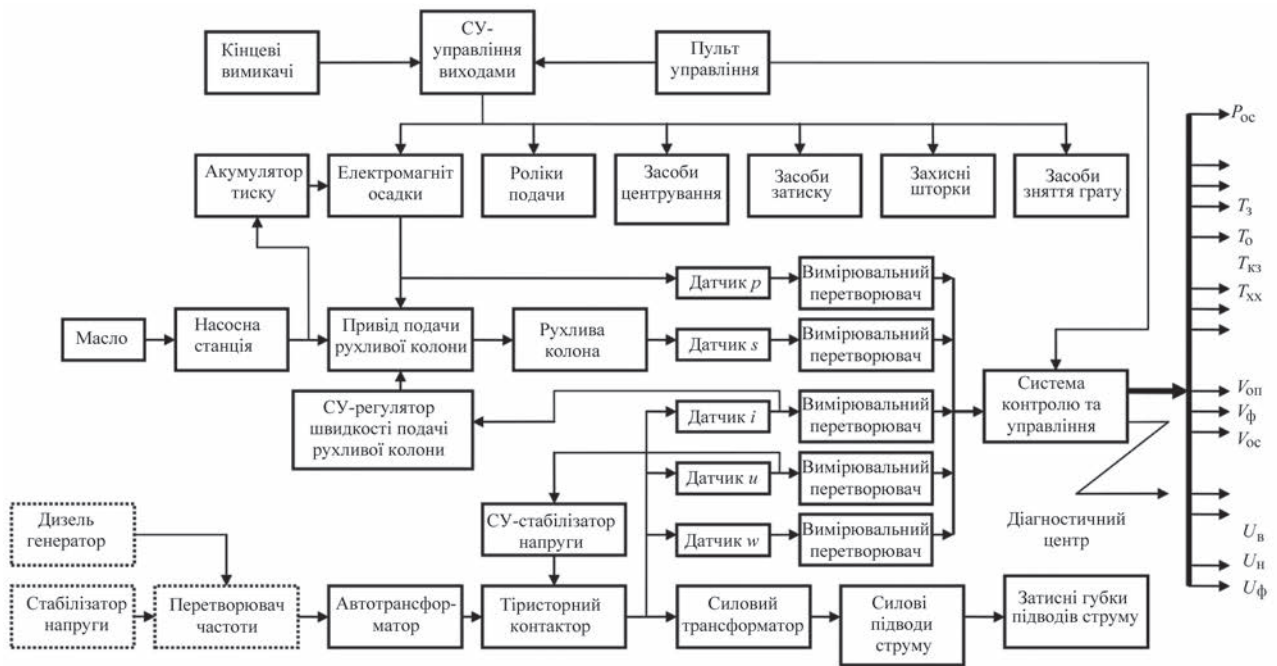


Рис. 4. Структурна схема контактної машини для зварювання оплавленням

лони в комплекті з датчиком переміщення на вхід блоку управління приводу подається сигнал напруги у вигляді сходів різної полярності (рис. 3).

Другим видом тесту є відпрацювання заданої циклограми зварювання без включення зварювального струму (тобто без виробів, що зварюються). При цьому перевіряється точність відпрацювання заданої напруги, величина швидкості переміщення на різних етапах процесу.

Функціональна діагностика виконується в процесі зварювання виробів. При цьому оцінюються середнє й середнє квадратичне відхилення (СКВ) параметрів режиму зварювання. Зварювальна машина уявляється у вигляді логічно зв'язаних вузлів і параметрів, на які вони можуть впливати (рис. 4).

Із цієї логічної схеми визначено логічні функції зв'язку розладнання вузлів залежно від статистично значимих відхилень середніх і СКВ параметрів процесу (рис. 5), на які ці вузли впливають. За цими даними формуються рекомендації з технічного обслуговування зварювальної машини.

Розроблено також алгоритми розрахунку передбачення змін параметрів зварювальної машини в часі (зокрема повного опору вторинного контуру) для попереджувального ремонту машини й алгоритм підстроювання залежностей, які використовуються для діагностики вузлів за даними ремонту машини.

Крім описаних причин виникнення браку – несприятлива комбінація параметрів процесу й незадовільний технічний стан зварювального устаткування – для контактного зварювання рейок на стаціонарних і пересувних зварювальних машинах можна виділити наступні причини, які можуть приводити до відхилень у ході технологічного процесу й, як наслідок, до порушення якості зварених стиків:

– незадовільне виконання допоміжних операцій по підготовці рейок перед зварюванням (косина торців і зачищення поверхні під губки) і обробці стиків після зварювання (механічна обробка поверхні рейок у місці стиків, термічна обробка стиків);

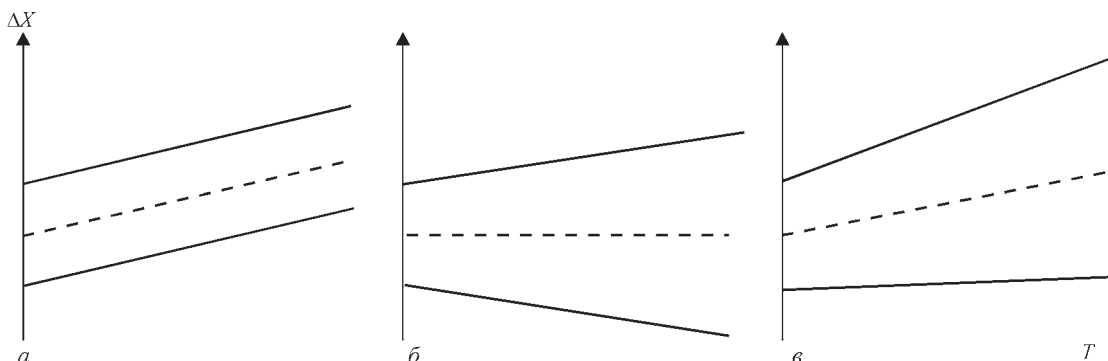


Рис. 5. Види відхилень параметрів режиму зварювання: тренд у часі середнього значення при постійному СКВ (а), тренд СКВ при постійному середньому значенні (б) та одночасний тренд середнього та СКВ (в)

- відхилення фізико-хімічних властивостей металу рейок;
- незадовільне дотримання технологічних операцій зварником (центрування рейок, оплавлення торців рейок перед зварюванням, охолодження деталей перед зварюванням);
- недостовірний контроль процесу за даними механічного руйнування зварених зразків і методу ультразвукової дефектоскопії (УЗД);
- незадовільні умови виробництва (неприпустимі зміни температури навколишнього середовища, напруги мережі).

Для виявлення описаних збурювань розроблений алгоритм статистичної обробки даних за параметрами процесу, при якому масиви протоколів зварювання стиків обробляються з їхнім поділом і групуванням за відповідними ознаками (таблиця).

У процесі зварювання в режимі реального часу (online) формується наступна інформація (рис. 6):

1. При зварюванні стиків за обмірюваними значеннями параметрів зварювального процесу $x_1 \dots x_{12}$ за допомогою алгоритму контролю розраховується показник якості зварного з'єднання – ймовірність відповідності його вимогам ТУ, а також середні значення $\bar{x}_1 \dots \bar{x}_{12}$ і СКВ $Sx_1 \dots Sx_{12}$ для кожної пліті та зварювальної машини. Ці дані формують базу даних змінних рапортів. За даними середніх значень із усередненням порядку 10...20 зварювань формуються рекомендації з коректування режиму зварювання для зсуву розподілу випадкових значень даних вимірів у центр інтервалу допусків.

2. За даними УЗД перевіряється наявність тріщин, пор і т. п. у кожному зварному стикі, ці дані заносяться в бази даних дефектоскопії. Візуально також перевіряється якість механічної обробки зварного стикі після зняття ґрату. Інформація про наявність дефектів у вигляді тріщин, пор і неякісної обробки стикі негайно надходить звар-

никові та змінному майстрові. Дефектний стик вирізається.

Перераховані функції виконуються поза системою контролю, введення даних дефектоскопії виконуються вручну.

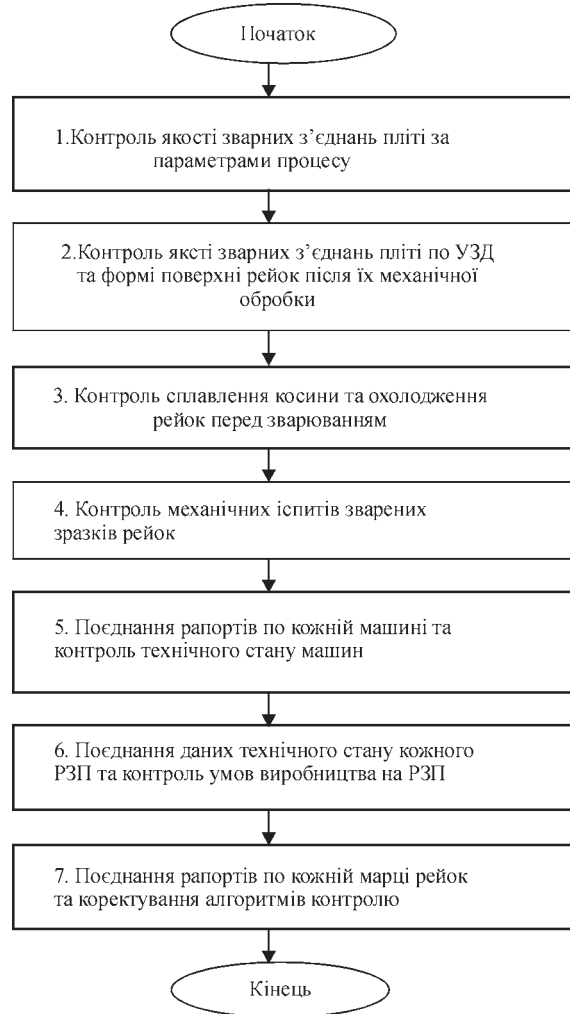


Рис. 6. Алгоритм контролю процесу зварювання рейок (пп. 1, 3, 5–7 – операції, які автоматизовані в системі контролю)

Групування алгоритмів обробки

| Причина виникнення порушень технологічного процесу зварювання рейок | Параметри ідентифікації | Об'єм вибірки | Параметр поділу масивів | Параметр впливу |
|--|---|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Підготовка рейок перед зварюванням і обробка стиків після зварювання | $T_{оп}$, косини, $Z_{кз}$, візуальні дані обробки стиків після зварювання | 2...4 год | ПШБ майстрів зміни + РЗП | Методика та устаткування |
| Технічний стан зварювального устаткування | $T_з$, $U_в$, $U_{оп}$, $V_{оп}$, $V_ф$, $V_{ос}$, $S_{оп}$, $S_{ос}$, $Z_{кз}$ | 1 зміна | Зварювальна машина | Технічне обслуговування |
| Фізико-хімічні властивості металу рейок | $L_{пр}$, F_p , дані дефектоскопії | 1 зміна | Партия, марка рейок | Коректування режиму |
| Технологічні операції зварника | $T_з$, T між зварюванням і оплавленням косини, $Z_{кз}$, прослизання | Відразу при виявленні або 1 зміна | ПШБ зварника | Методика (виробничі інструкції) |
| Контроль процесу зварювання зразків і УЗД | $L_{пр}$, F_p , дані УЗД | 1 зміна | ПШБ зварника дефектоскописта | Методика та устаткування |
| Умови виробництва | $U_в$, $U_{оп}$, $V_{оп}$, $V_ф$, $V_{ос}$ | День-ніч | РЗП | Стабілізація U_c або $T_{мастила}$ |
| Несприятлива комбінація параметрів процесу | Нечіткий алгоритм контролю | Відразу при виявленні | Пліть | Коректування режиму |

3. За часом після сплавлення косини й зварювання стику визначається час охолодження після сплавлення косини. Інформація про неприпустимі відхилення негайно надходить зварникові й змінному майстрові.

4. На початку, середині та наприкінці зміни проводиться зварювання зразків рейок та їх механічне випробування. Дані випробувань: стріла прогину $L_{пр}$ і руйнівне зусилля F_p порівнюються із заданими значеннями. Якщо отримані значення менше заданих, проводиться зварювання й випробування додаткових зразків для виявлення вірогідності неприпустимого відхилення. При підтвердженні неприпустимого відхилення процесу здійснюється коректування режиму зварювання. Отримані дані також використовуються для підстроювання моделі контролю якості зварювання, а по стабільності $SL_{пр}$, SF_p визначається зношування преса для випробувань і досконалість методики.

Перераховані функції виконуються поза системою контролю, уведення механічних випробувань зразків здійснюється вручну.

У режимі offline формується наступна інформація:

5. Для контролю технічного стану зварювальної машини дані по плітях однієї і тій же марки рейок, зварених на одній і тій же машині, об'єднуються у протокол технічного стану зварювальної машини. Час реакції, а відповідно час усереднення можуть бути значними – від однієї до декількох змін. У випадку аварійної ситуації інформація про ремонт надходить негайно.

6. Для контролю умов виробництва об'єднуються статистичні оцінки зварювання на тих самих режимах і на тому самому типі машин кожного РЗП. По напрузі U_b , $U_{оп}$ визначається стабільність електричної мережі, а по швидкостях $V_{оп}$, $V_{ф}$, $V_{ос}$ – стабільність властивостей мастила в механізмах приводу, яке у свою чергу пов'язане з температурою навколишнього середовища. Порівняння цих оцінок на різних РЗП може послужити підставою для застосування заходів щодо вдосконалення умов виробництва.

7. Для уточнення допусків на контроль процесу статистичні дані по всім РЗП поєднуються для кожної марки рейок і відповідному режиму зварювання.

Для статистичного керування технологічним процесом зварювання на РЗП використовуються алгоритми контролю та керування виробництвом на основі рекомендацій державних стандартів із статистичного керування технологічним процесом, у яких використовуються коефіцієнти точності K_T , налаштованості K_H і стабільності K_C :

$$K_T = \frac{6S}{\delta} \leq 1; K_H = \frac{\bar{x} - x_{\delta}}{\delta} \rightarrow 0; K_C = \frac{S_{t1}}{S_{t2}} \rightarrow 1,$$

де δ – поле допуску на параметр; x_{δ} – середина поля допуску; S_{t1} – СКВ у фіксований момент часу t_1 ; S_{t2} – СКВ у порівнюваний фіксований момент часу t_2 .

Для аналізу відхилень необхідно враховувати, що контрольовані параметри $S_{оп}$, U_b , $U_{оп}$, $U_{ф}$, $S_{ос}$, та часу осадки зі струмом $T_{осі}$ задаються безпосередньо в системі керування. $P_{ос}$ визначається настроюванням тиску в циліндрі осадки.

Водночас параметри $V_{оп}$, T_3 , $V_{ф}$, $V_{ос}$ задаються непрямым шляхом: $V_{оп}$ та $V_{ф}$ залежать від параметрів регулятора приводу подачі рухливої колони;

$$T_3 = S_k/V_k + S_{оп}/V_{оп} + S_{ф}/V_{ф} + T_{осі},$$

де – S_k , V_k – припуск і середня швидкість на етапі зняття косини.

Швидкість осадки $V_{ос}$ залежить від заданого тиску осадки, технічного стану приводу осадки та рухливої колони і нагрівання металу рейок перед осадкою.

У цьому зв'язку оцінка виду збурювання за параметрами $V_{оп}$, T_3 , $V_{ф}$, $V_{ос}$ ускладнена.

Всього було оброблено даних по 32361 стику, виконаним протягом 2013 і 2014 рр. 36 зварниками на 6 стаціонарних машинах К-1000 та 6 підвісних машинах К-922, які входять до складу 4 РЗП: 5, 6, 13 і 39. За винятком часу $T_{осі}$, допуски для інших параметрів для машин К-1000 і К-924 збігаються.

Коефіцієнти K_H характеризують величину завдання у відносних одиницях кожного параметра режиму за масивом згрупованих даних – зварник, машина (рис. 7, 8), РЗП (рис. 9). В ідеальному випадку, коли технічні характеристики та технічний стан зварювальних машин, умови підготовки рейок до зварювання й умови виконання самого зварювання за температури навколишнього середовища, стабільності напруги живлення мережі й т. п., а також фізико-хімічні властивості зварювальних металів однакові можна припустити, що ці коефіцієнти повинні бути однакові. Розбіжність коефіцієнтів K_H для тих самих параметрів пов'язане з тим, що режим зварювання підбирається за даними випробування зразків для кожної машини, і, отже, відбиває відмінності в перерахованих умовах проходження процесу зварювання.

За даними K_H для $V_{ф}$, $V_{ос}$, $S_{оп}$, $P_{ос}$, $S_{ос}$, $T_{осі}$ видно, що ці параметри мають практично однаковий зсув для всіх машин (рис. 7, 8). При цьому крім $P_{ос}$ цей зсув негативний. Позитивний зсув для $P_{ос}$ ймовірно пов'язаний з нестабільністю насосної станції та завищенням його заданого значення для недопущення

зниження тиску нижче мінімального припустимого. Якщо при таких налаштуваннях режиму якість зварних стиків відповідає ТУ, то можливе коректування припустимих відхилень параметрів для того, щоб центр розподілу їх значень перебував у середині допуску і значення K_n наблизилися до нуля.

K_n для $V_{оп}$, T_3 мають різні за знаком значення, що можна характеризувати як знаходження заданого значення в центрі допусків. Обидва ці параметра задаються непрямим шляхом і їх значення є результатом впливу різних факторів. Однак більші відхилення K_n (0,29 для $V_{оп}$ і 0,46 для T_3) свідчать про наявність значного неконтрольованого збурювання. У цьому випадку може поставати питання про нестабільність якості підготовки стиків перед зварюванням або операції з його усунення (зняття косини крайок рейок шляхом оплавлення).

Оцінки K_n об'єднані за РЗП (рис. 9) підтверджують, що практично всі параметри, крім $P_{ос}$, задані менше середнього їхнього значення в допуску. Можна припустити, що для таких параметрів як $V_{оп}$, T_3 , $S_{оп}$, $S_{ос}$, $T_{осі}$ слід переглянути ТУ.

Коефіцієнти K_T більше 1 однозначно говорять про необхідність ремонту або профілактичних ро-

біт на відповідній машині. Але таке відхилення за $V_{оп}$ і T_3 може бути пов'язане, як ми вже відзначали, з нестабільністю підготовки стиків під зварювання на всіх РЗП або інших факторів. Особливо це проявляється для машин К-922 для РЗП-39 (рис. 10, 11, машини 10, 11, 12).

Серед параметрів, що безпосередньо задаються, майже по всіх машинах є неприпустимі відхилення $P_{ос}$. Це може бути пов'язане з нестабільністю роботи насосних станцій і кліматичних умов, у яких вони працюють. Із цієї причини, щоб не допустити падіння $P_{ос}$ нижче допуску, можливо, спостерігаються завищені значення K_n за $P_{ос}$. Крім того, на РЗП-5 на машині 2, РЗП-11 на машині 7 і всіх машинах К-922 РЗП-39 є низька точність U_B (10, 11, 12), що може бути пов'язане з незадовільною якістю електричного живлення та підготовки стиків під зварювання.

На машинах, згрупованим за номерами РЗП, видно різке збільшення майже в 2 рази K_T за T_3 для РЗП-39 у порівнянні з іншими РЗП (рис. 12). Хоча параметри, які визначають $T_3 - V_{оп}$, $V_{ф}$, $S_{оп}$,

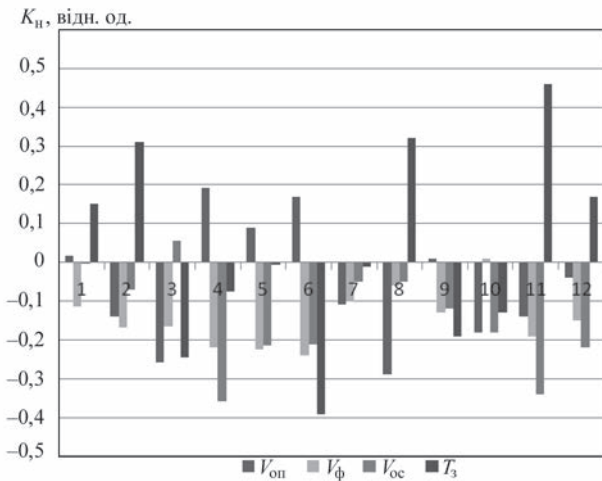


Рис. 7. Коефіцієнти налаштування K_n параметрів $V_{оп}$, $V_{ф}$, $V_{ос}$, T_3 для 12 однотипних машин РЗП

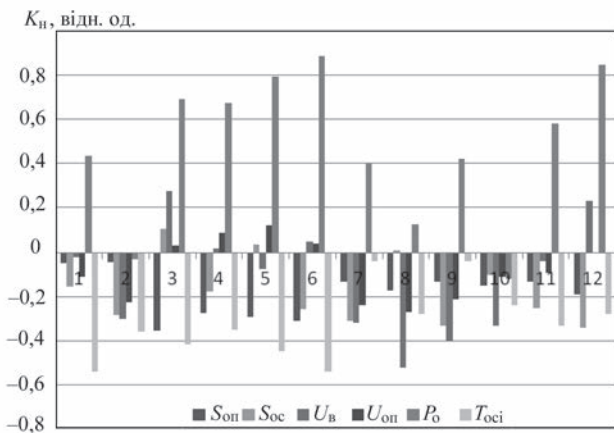


Рис. 8. Коефіцієнти налаштування K_n параметрів $S_{оп}$, U_B , $U_{оп}$, $P_{ос}$, $S_{ос}$, $T_{осі}$ (1–12 – номери машин РЗП)

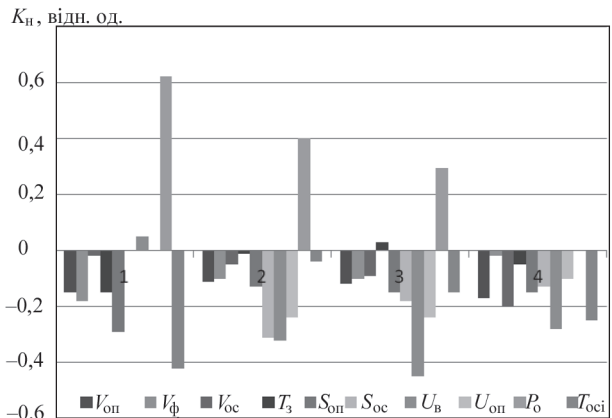


Рис. 9. Коефіцієнти налаштування параметрів K_n для всіх зварювальних машин РСП-5 (1), РСП-11 (2), РСП-13 (3), РСП-39 (4)

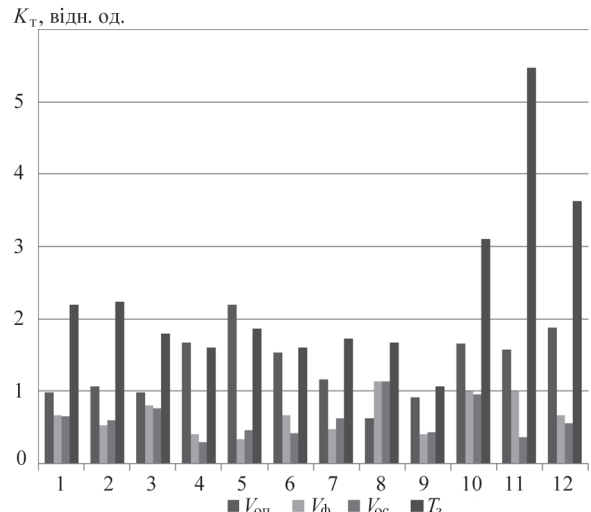


Рис. 10. Коефіцієнти точності K_T параметрів $V_{оп}$, $V_{ф}$, $V_{ос}$, T_3 (1–12 – номери машин РЗП)

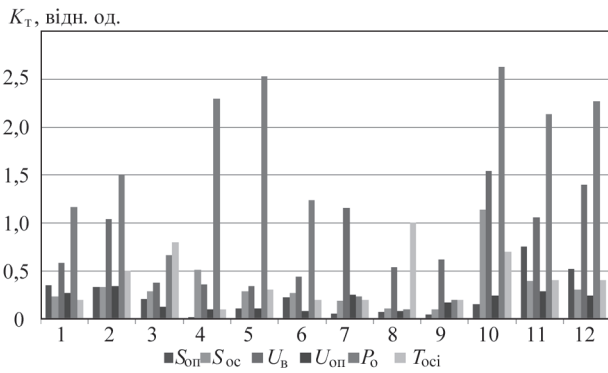


Рис. 11. Коефіцієнти точності K_T параметрів $S_{оп}$, U_B , $U_{оп}$, $P_{о}$, $S_{ос}$, $T_{осі}$ (1–12 – номери машин РЗП)

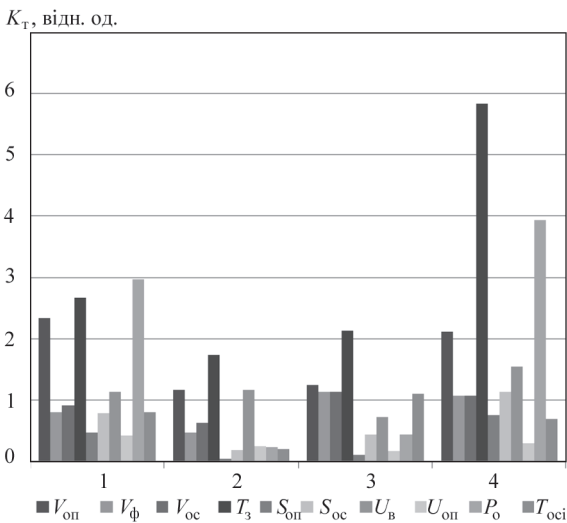


Рис. 12. Коефіцієнти точності параметрів K_T для всіх зварювальних машин Р5П-5 (1), РЗП-11 (2), РЗП-13 (3), РЗП-39 (4) за значенням K_T практично мало відрізняються для всіх 4 РЗП. Можна припустити, істотна відмінність якості підготовки стиків під зварювання в гіршу сторону на РЗП-39. Порівняння точності за іншими параметрами показує, що крім $P_{ос}$, інші параметри мають малу розбіжність K_T . У порівнянні із РЗП-6 і РЗП-11, K_T для $P_{ос}$ РЗП-5 і РЗП-39 різко відрізняється, що ще раз підтверджує, що насосні станції на цих РЗП по технічному стану сильно відрізняються.

У висновку відзначимо дані за кількістю виходів параметрів з допусків по кожній зварювальній машині. За параметрами $S_{оп}$, $U_{оп}$, $T_{кз}$, $T_{осі}$ виходів з допусків не спостерігали. Незначне число виходів з допуску спостерігали за параметрами $S_{ос}$ і $V_{ос}$ для машин РЗП-39. Причина можлива в завданні параметрів режиму або помилок роботи системи керування. За параметрами контролю, які задаються непрямым шляхом, як і слід було сподіватися з попереднього аналізу, найбільше число виходів із допусків $T_з - 10...40\%$, далі $V_{оп} - 5...12\%$ і найменше $V_ф$ – до 2% (рис. 13). Серед параметрів, які задаються прямим способом, очевидна першість за $P_{ос}$ ($35...100\%$) і U_B ($10...40\%$) (рис. 14).

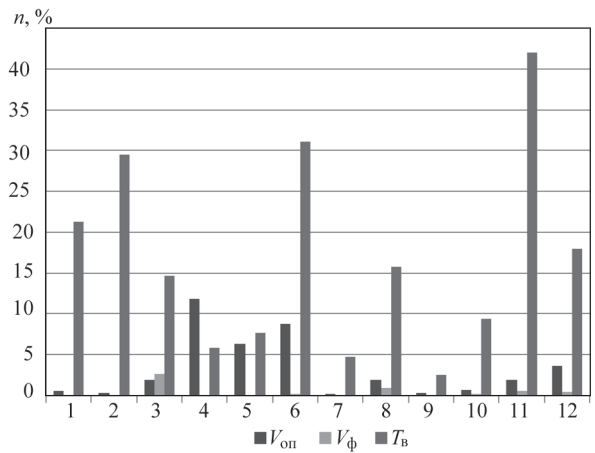


Рис. 13. Число виходів з допусків n параметрів $V_{оп}$, $V_ф$ і $T_з$ (1–12 – номери машин РЗП)

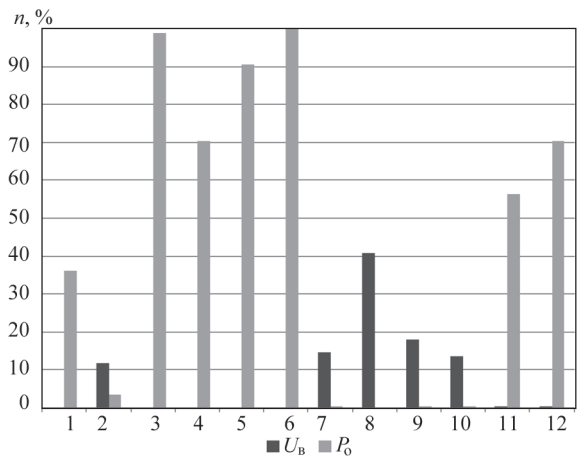


Рис. 14. Число виходів з допусків n параметрів $P_{ос}$ і U_B (1–12 – номери машин РЗП)

Крім наведеного аналізу, у якості підсумкового документа про роботу РЗП формується зведення за продуктивністю, показниками якості, даними по обслуговуванню машин. Очевидно, що крім технічних питань, описаний алгоритм торкається організаційних проблем усього виробництва залізничних шляхів і повинен бути уточнений не тільки за експериментальної експлуатації системи керування, а в першу чергу, погоджений з керівництвом служби шляхового господарства Укрзалізниці.

Висновки

1. Проведено аналіз існуючих систем контролю та управління процесом контактного стикового зварювання з урахуванням сучасних марок рейкових сталей, скориговано технічні умови на процес зварювання цих рейок. Розроблено ТЗ на дворівневу систему контролю та управління процесом, яка дозволить покращити якість зварних з'єднань за рахунок поліпшення умов зварювання, підвищення достовірності контролю якості зварного з'єднання в реальному часі, контролю технічного стану зварювального обладнання та оптимізації технологічного процесу в наслідок статистичного управління.

2. Запропоновано алгоритм контролю якості зварювання на основі методу «нечіткої» логіки, який дозволяє робити висновок з певним ступенем вірогідності про якість зварювання за технологічними параметрами та логічними правилами, які складені за результатами досліджень особливостей процесу стикового зварювання оплавленням. Цей алгоритм враховує ймовірності появи неякісного стику при знаходженні параметрів процесу на периферії області дозволених значень, а також підсиленні впливу на процес комбінацій відхилень деяких параметрів.

3. Розроблено алгоритми тестового та функціонального контролю технічного стану зварювального устаткування, що забезпечують його працездатність, своєчасне виявлення несправностей, а також попереджувальний і аварійний ремонт.

4. Для забезпечення необхідного внеску електричної енергії в процес зварювання стику розроблено пристрої стабілізації напруги живлення зварювального трансформатора на різних етапах процесу. Ці пристрої можна використовувати для існуючих зварювальних машин для живлення як від двофазної, так і трифазної мережі, що розширює область застосування машин з урахуванням сучасних стандартів на використання електричної енергії.

5. Розроблений алгоритм статистичного контролю процесу за даними рапортів про зварювання на кожній машині РЗП країни, за допомогою якого

можливо виявити систематичні порушення процесу як на стадії зварювання, так і на стадіях підготовки рейок для зварювання та обробки зварних стиків. Стає можливим виявити наявність відхилень у виконанні існуючої технології та різного характеру збурень, характерних для окремих зварників, машин, РЗП та оптимізації процесу зварювання для рейок кожної марки за даними рапортів, які отримано на всіх РЗП.

6. Розроблена система та її елементи пройшли експериментальну перевірку на РЗП-5. Алгоритми статистичного контролю перевірено за даними діагностичного центру Укрзалізниці.

Список літератури

1. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швец В.И. и др. (2016) Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 7–16.
2. Кучук-Яценко С.И., Руденко П.М., Гавриш В.С. и др. (2015) Преобразователь частоты и числа фаз для контактной стыковой сварки рельсов. *Там же*, **7**, 41–43.
3. Руденко П.М., Гавриш В.С. (2013) Тиристорный преобразователь с непосредственной связью для питания контактных машин. *Там же*, **8**, 55–58.

References

1. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 4-12.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavriush, V.S. et al. (2015) Converter of frequency and number of phases for flash-butt welding of rails. *Ibid.*, **7**, 38-40.
3. Rudenko, P.M., Gavriush, V.S. (2013) Thyristor direct converters for supply of resistance welding machines. *Ibid.*, **8**, 54-56.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ РЕЛЬСОВ В СТАЦИОНАРНЫХ И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ

С.И. Кучук-Яценко, П.М. Руденко, В.С. Гавриш, А.В. Дидковский, Е.В. Антипин

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

Для контактной стыковой сварки рельсов из термически упрочненной стали проведены исследования и разработаны режимы сварки и технические условия на процесс. Согласно техническим условиям разработана двухуровневая система, которая позволяет повысить точность контроля и управления процессом сварки. На нижнем уровне в системе прямого цифрового управления контролем качества сварных соединений предложен алгоритм на основе «нечеткой» логики, учитывающий размытость границ допустимых отклонений, распределение параметров процесса внутри допуска и взаимное влияние комбинации параметров на показатель качества стыка. Контроль технического состояния оборудования осуществляется по данным тестовой и функциональной диагностики. Для обеспечения стабильного энергопитания разработано оборудование стабилизации напряжения на входе сварочного трансформатора при питании от двухфазной электрической сети и преобразователь частоты и числа фаз для питания от трехфазной сети. На верхнем уровне в диагностическом центре Укрзалізниці осуществляется статистическая обработка протоколов сварки рельсов, которые поступают из предприятий отрасли, для выявления отклонений, которые сложно проконтролировать прямыми измерениями, например, неудовлетворительное выполнение вспомогательных операций по подготовке рельсов перед сваркой, отклонения физико-химических свойств металла рельсов, неудовлетворительное соблюдение технологических операций сварщиком, неудовлетворительные условия производства. Разработанные алгоритмы и технические средства автоматизации прошли экспериментальную проверку и могут быть рекомендованы для дальнейшего внедрения в производство. Библиогр. 3, табл. 1, рис. 14.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, термически упрочненные железнодорожные рельсы, система управления, контроль качества, контроль технического состояния оборудования, статистический контроль

SYSTEM OF CONTROLLING THE PROCESS OF FLASH-BUTT WELDING OF RAILS UNDER STATIONARY AND FIELD CONDITIONS TO EXTEND THE SERVICE LIFE AND RELIABILITY OF RAILWAY TRACKS

S.I. Kuchuk-Yatsenko, P.M. Rudenko, V.S. Gavrish, O.V. Didkovskiy, E.V. Antipin

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

Investigations were performed and welding modes and process specification were developed for flash-butt welding of rails from thermostrengthened steel. In keeping with the specification, a two-level system was developed, which allows increasing the accuracy of monitoring and control of the welding process. At the lower level in the system of direct digital monitoring of welded joint quality an algorithm based on «fuzzy» logic was proposed, which allows for blurred boundaries of admissible deviations, distribution of process parameters within the tolerance and mutual influence of parameter combination on butt joint quality characteristic. Technical condition of the equipment is monitored by the data of test and functional diagnostics. To ensure stable energy input, equipment for voltage stabilization at welding transformer input at power supply from two-phase mains and frequency and phase number converter at power supply from three-phase mains were developed. At the upper level, Ukrzaliznitstva Diagnostic Center performs statistical processing of rail welding protocols coming from the industry enterprises, in order to detect deviations, which are difficult to control by direct measurement, for instance, poor performance of additional operations on rail preparation for welding, deviations of physico-chemical properties of rail metal, unsatisfactory performance of technological operations by the welder and unsatisfactory production conditions. Algorithms and technical means were developed, which have passed experimental trials and can be recommended for further introduction into production. 3 Ref., 1 Tabl., 14 Fig.

Keywords: flash-butt welding, thermostrengthened rails, control system, quality control, monitoring technical condition of equipment, statistical control

Надійшла до редакції
20.02.2019



Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики



Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона
Національної академії наук України



Міжнародний виставковий центр



ICNDT
The World Organisation for NDT

Міжнародний комітет з неруйнівного контролю



Європейська федерація з неруйнівного контролю

9-а Національна науково-технічна конференція і виставка

Неруйнівний контроль та технічна діагностика

Україна, Київ, 19-21 листопада 2019

ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України
Міжнародний виставковий центр

Основні теми конференції:

- нові методи і технології неруйнівного контролю;
- моніторинг технічного стану і продовження експлуатаційного ресурсу об'єктів енергетики, нафто- і газопроводів;
- підвищення енергоефективності будівель та споруд;
- проблемні питання неруйнівного контролю в транспортній галузі;
- неруйнівний контроль дорожньої інфраструктури;
- стандартизація, підготовка і сертифікація персоналу;
- демонстрація сучасного обладнання для НКТД виробниками і постачальниками

Важливі дати:

- | | |
|-------------------|------------------|
| Надання доповідей | до 30.09.2019 р. |
| Заявка на участь | до 20.10.2019 р. |
| Оплата за участь | до 31.11.2019 р. |

Адреса і телефони Оргкомітету:



Українське товариство неруйнівного контролю і технічної діагностики

Адреса для листів: 03150, м. Київ-150, а/с 187, УТ НКТД
Тел.: (+380 44) 200-46-66, 205-22-49, 200-81-40, 205-21-96
e-mail: usndt@ukr.net
інтернет: www.usndt.com.ua

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЭМА СПОСОБОМ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ. ВОЗМОЖНОСТИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ (Обзор ч. 3)

Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, С.Ю. Плеснецов

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». 61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2.
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Выполнен анализ информационных источников, в которых приведены данные о чувствительности ультразвукового неразрушающего контроля при обнаружении естественных внутренних дефектов металлоизделий приборами и установками с электромагнитно-акустическими преобразователями. Установлено, что электромагнитно-акустические устройства выгодно отличаются от традиционных тем, что они обеспечивают эффективное выявление дефектов не дающие отраженных сигналов, имеющих малые размеры и неблагоприятную ориентацию относительно направления распространения ультразвуковых импульсов. Новые электромагнитно-акустические преобразователи обеспечивают толщинометрию с воздушными зазорами или диэлектрическими покрытиями величиной до 10 мм. Библиогр. 13, рис. 14.

Ключевые слова: металлоизделие, качество, дефект, электромагнитно-акустический, преобразователь, дефектоскопия, чувствительность контроля, толщинометрия

В статьях [1–2] обобщены данные о чувствительности электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (ЭМАП), в основном по выявлению моделей дефектов разной формы и размеров. Данные о чувствительности ЭМА устройств по выявлению внутренних естественных дефектов металлоизделий в литературе практически не приводятся.

Целью работы является анализ возможностей ЭМА устройств по выявлению внутренних естественных дефектов, а также чувствительности при толщинометрии металлоизделий.

Ультразвуковая ЭМА дефектоскопия при массовом производстве металлоизделий. Большинство металлоизделий, выпускаемых в больших объемах, производят путем прокатки со значительными степенями обжатия заготовок: рельсы, трубы, заготовки, балки и др. Это одновременно приводит к обжатию внутренних дефектов, таких как расслоения, ликвации, скопления неметаллических включений (НВ) и т. п., до тонких и сверхтонких размеров.

Традиционный контактный ультразвуковой контроль (УЗК) проводят, чаще всего, иммерсионным или струйным методами [3] с использованием продольных волн. Продольные волны не всегда обеспечивают обнаружение тонких дефектов, особенно при падении ультразвуковых лучей нормально или вдоль плоскости несплошности. Практически не обнаруживаются ликвации или ско-

пления мелких НВ, которые не дают отражений эхо-импульсов. В результате, например, в железнодорожные пути попадают рельсы с дефектами, которые приводят к авариям поездов (рис. 1) [4].

В 1983–1985 гг. на трех рельсопрокатных комбинатах Советского Союза были внедрены автоматические установки УЗК в потоке производства с применением ЭМА способа возбуждения и приема импульсов ультразвуковых линейно-поляризованных колебаний [5–7]. Контроль выполнялся совмещенным ЭМА преобразователем зеркально-теневым методом в зоне, ограниченной толщиной шейки объемно и поверхностно закаленных рельсов типа Р65 и Р75 на частоте $1,8 \pm 0,2$ МГц. В процессе поточного контроля дефектные участки отмечались краской. Из дефектных участков вырезались темплеты, которые были исследованы металлографическим методом. Кроме того, для сравнения результатов дефектные участки



Рис. 1. Авария на Западно-Сибирской дороге (РФ). Излом рельса

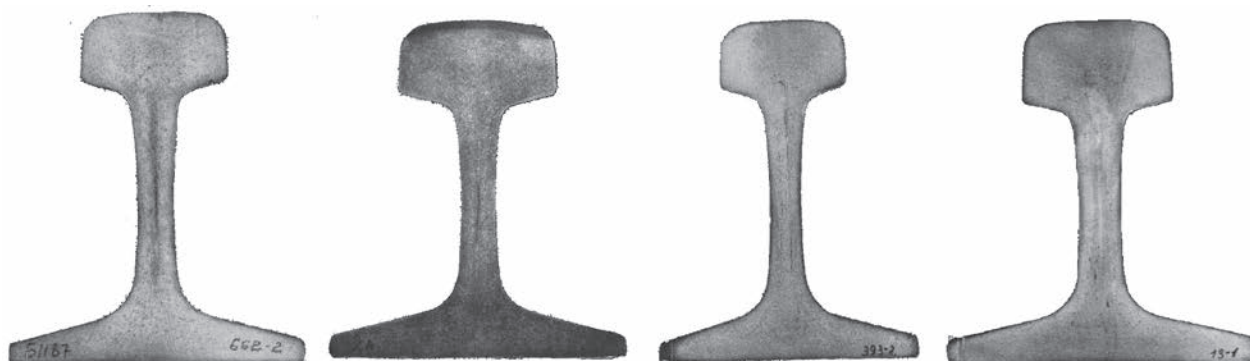


Рис. 2. Результаты металлографической проверки дефектных участков рельсов типа Р65 и Р75, обнаруженных рельсовыми ЭМА дефектоскопами при поточном контроле зеркально-теневым методом [7]

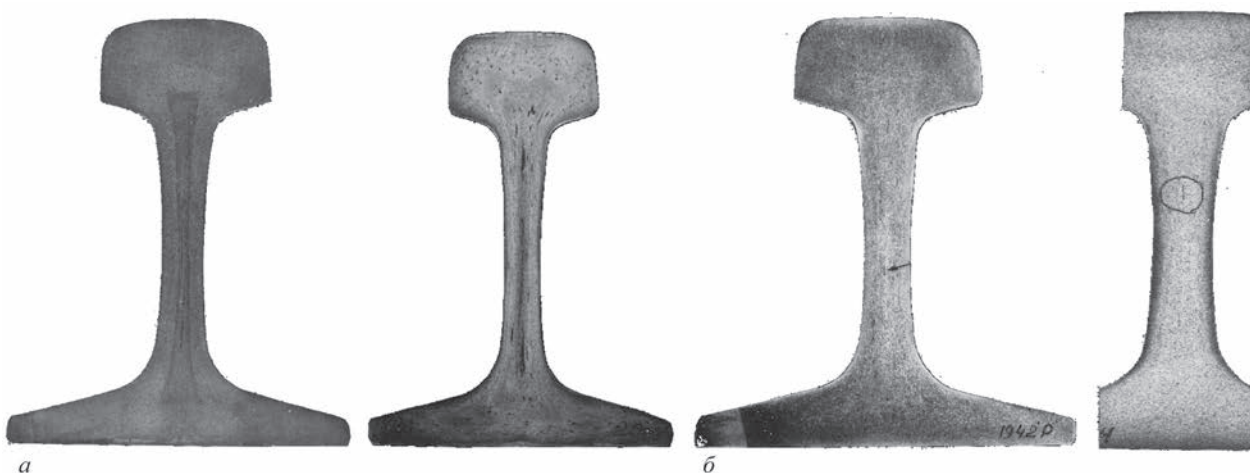


Рис. 3. Изображения темплетов с дефектами типа ликвация (а) и с вертикальными микротрещинами (б) в шейке рельсов типа Р65 и Р75, обнаруженные автоматическими ЭМА дефектоскопами в потоке производства рельсoproкатных заводов [7]

были проконтролированы контактным дефектоскопом. Результаты металлографических исследований, выявленных ЭМА установкой, дефектных участков приведены на рис. 2, 3 [7].

Анализ результатов металлографического контроля темплетов показал следующее. В основном обнаруженные только ЭМА дефектоскопами дефекты можно разделить на три группы. Первая группа – сосредоточенные и пятнистые ликвации (рис. 3, а). Вторая группа – не заполненные материалом вертикальные микрорасслоения (рис. 3, б; 4). Третья группа – вертикальные расслоения, заполненные НВ (рис. 5).

При металлографических исследованиях темплетов из дефектных участков рельсов по результатам ЭМА дефектоскопии были обнаружены участки визуально являющиеся годными. Дополнительные исследования образцов из таких участков путем их излома позволили обнаружить сверхтонкие плоскости хрупких НВ (рис. 6), т. е. чувствительность ультразвукового ЭМА контроля является высокой.

В 1985 г. в потоке производства ОАО «Кузнецкий металлургический комбинат» была введена в эксплуатацию автоматическая установка ультразвукового ЭМА зеркально-теневого контроля го-

ловки рельсов со стороны одной боковой грани [8]. Параметры контроля: частота заполнения зондирующего импульса – 1,9 МГц; индукция постоянного магнитного поля в зазоре между ЭМАП и головкой рельса – 0,9 Тл; зазор между ЭМАП и рельсом – 0,5 мм; соотношение амплитуды донного сигнала и помех на контрольном образце не менее 21 дБ. Примеры изображений дефектных

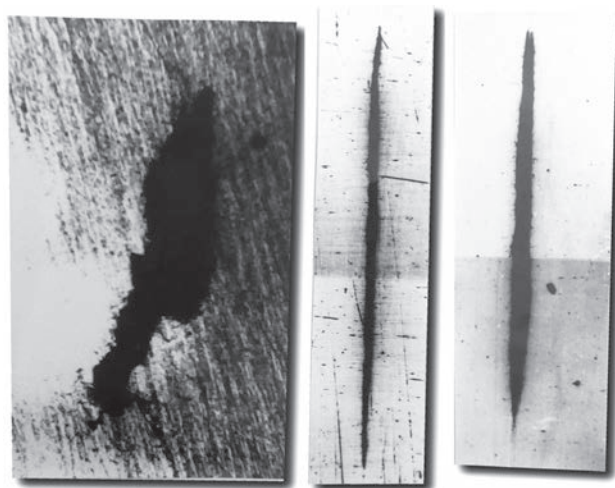


Рис. 4. Вертикальные микрорасслоения ($\times 100$) в дефектных участках шейки рельсов, не заполненные твердым материалом, обнаруженные ЭМА дефектоскопами [7]

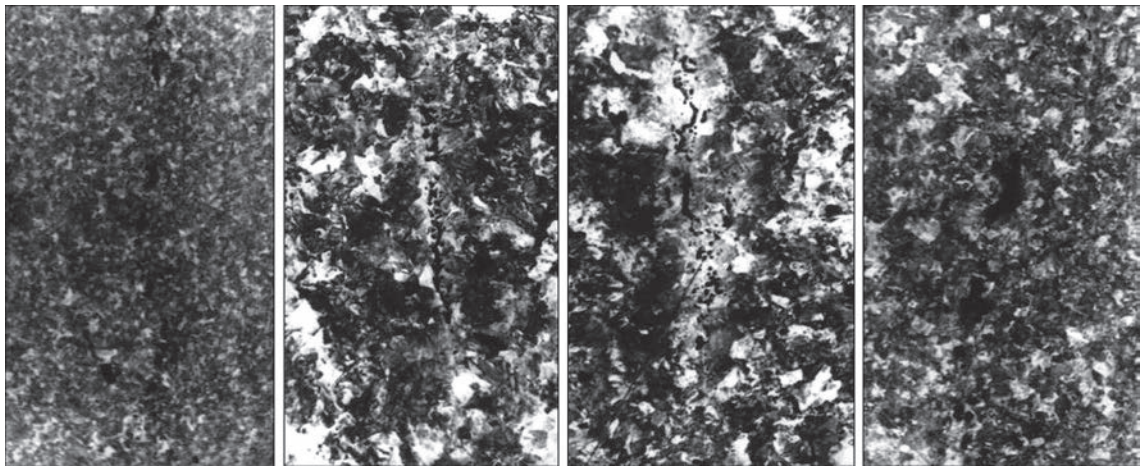


Рис. 5. Вертикальные микрорасслоения ($\times 200$) в дефектных участках шейки рельсов, заполненные НВ, обнаруженных ЭМА дефектоскопами [7]

участков рельсов, обнаруженных ЭМА установкой, приведены на рис. 7.

Из анализа изложенных данных можно сделать вывод о том, что ультразвуковой ЭМА контроль рельсов зеркально-теневым методом импульсами линейно-поляризованных колебаний обладает повышенной чувствительностью к дефектам, которые не выявляются традиционными контактными зеркально-теневым и эхо-методами, однако, являющимися недопустимыми по действующим стандартам и классификатору дефектов рельсов [4].

Анализ результатов работы участка ультразвукового ЭМА контроля рельсов импульсами сдвиговых волн на трех рельсопрокатных заводах

[9] показал, что выявляемость дефектов структуры рельсового металла выше примерно в 40 раз, чем при дефектоскопии традиционным контактным методом импульсами продольных волн. При этом после внедрения ЭМА контроля, число изъятых рельсов из железнодорожного пути вследствие развития дефектов по причине нарушений структуры при пропуске в 150 млн т, брутто уменьшилось с 4...7 шт. на 100 км пути почти до нуля.

Следует также отметить, что применение эхо-метода контроля ЭМА способом для обнаружения вертикальных трещин в рельсе также является эффективным [10]. Примером является трещина в подошве рельса (рис. 8), глубиной около 30 мм. Оз-

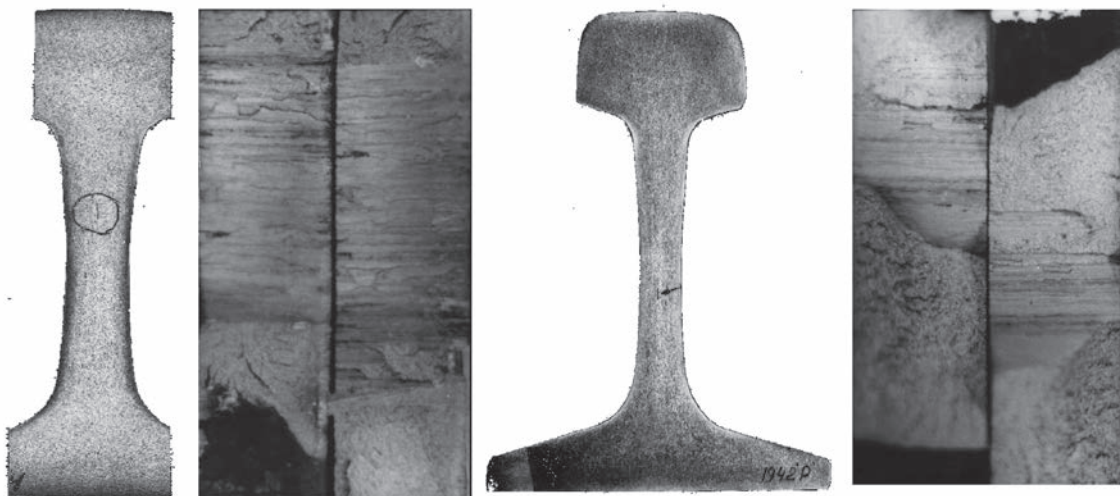


Рис. 6. Изображения дефектных участков железнодорожных рельсов с плоскими хрупкими НВ ($\times 100$), которые существенно снижают прочность металла и изображения их изломов [7]

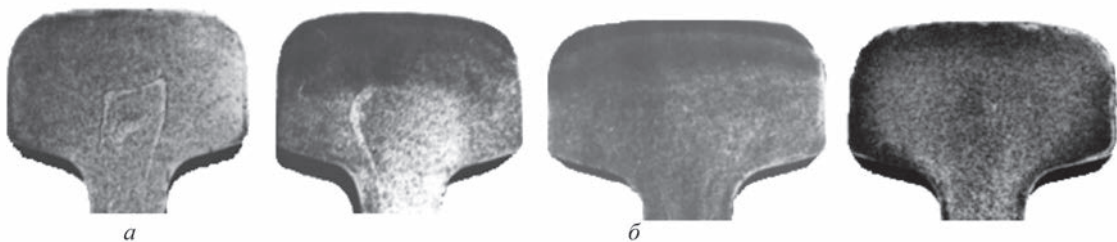


Рис. 7. Дефекты макроструктуры в головке рельсов в виде белых пятен (а) и скоплений НВ (б) [8]

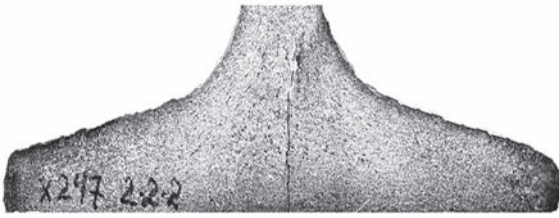


Рис. 8. Вертикальная трещина в подошве рельса, обнаруженная ЭМА дефектоскопом с применением эхо-метода контроля. Вручение дефекта выполняли со стороны поверхности катания головки рельса (расстояние от индуктора ЭМАП к вершине трещины около 150 мм). Установлено, что отношение амплитуд эхо-сигнал/шум по длине рельсовой пробы менялось от 0 до 4,5 раз. Эхо-сигнал был растянут во времени – от вершины дефекта до момента появления донного импульса. Это свидетельствует о том, что принимаются эхо-импульсы от боковой поверхности дефекта по всей его высоте. Данные свидетельствуют о высокой чувствительности ЭМА дефектоскопа по выявлению трещин также и эхо-методом.

В этом же образце, при прозвучивании шейки рельса с боковой поверхности (выше трещины), получены эхо-сигналы с отношением амплитуд эхо-сигнала и шума, достигающего 7, что эквивалентно плоскодонному отражателю диаметром 2 мм. Металлографическими исследованиями в отмеченных местах установлено наличие дефектов в виде пленок НВ толщиной менее 0,01 мм.

Аналогичная ситуация происходит при ЭМА контроле листового проката, плоские дефекты в котором расположены вдоль поверхности изде-

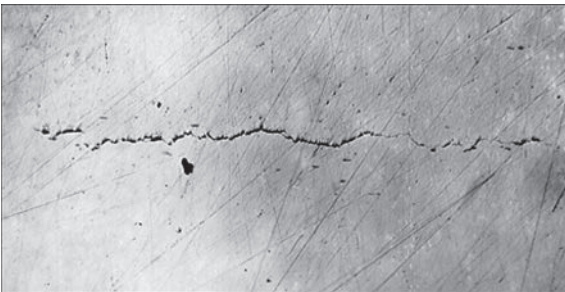


Рис. 10. Микротрещины в зоне темной полосы, обнаруженные контактным и ЭМА дефектоскопами ($\times 100$)

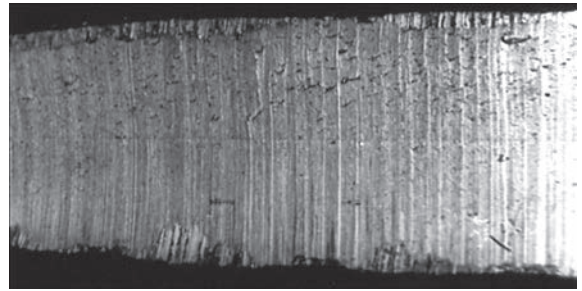


Рис. 9. Дефект в виде темной полосы в центральной части сечения листа (пропущенный при дефектоскопии у производителя [11]). Обнаружен при входном ЭМА контроле на Харьковском котельно-механическом заводе

лия. При УЗК листовых изделий ультразвуковые импульсы продольных и сдвиговых волн возбуждали нормально плоскости дефектов. Типичный вид обнаруженного дефекта такого типа в сечении листа показан на рис. 9 [11]. Наличие таких дефектов при сварке приводит к расслоению металла и разрушению элементов изделия.

Ниже приведены типичные результаты ультразвуковых и металлографических исследований на примере образцов, вырезанных из тела листов толщиной 40 мм с горячекатаной стали марки 09Г2С первого сорта вне зоны термического влияния и с участков, расположенных в зоне термического влияния при сварке. Металл, пораженный внутренними дефектами, которые были обнаружены ультразвуковым ЭМА методом, подвергнут исследованиям с помощью микроскопа «Neophot-2» на полированных и травленых шлифах, плоскость которых была ориентирована по толщине листа.

В центральной части полированных шлифов в зоне темной полосы (рис. 9), наблюдаются скопления НВ. Вне центральной зоны по толщине листа подобные скопления НВ не наблюдаются. В зонах скоплений НВ обнаружены протяженные микротрещины (рис. 10). Большинство несплошностей типа трещин и микротрещин, не заполненных посторонними включениями, обнаруживаются как контактным, так и ЭМА дефектоскопом. При выявлении микротрещин значительно меньше 0,01 мм чувствительность контактного дефектоскопа

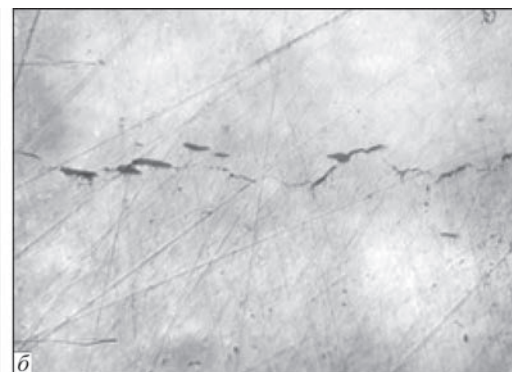
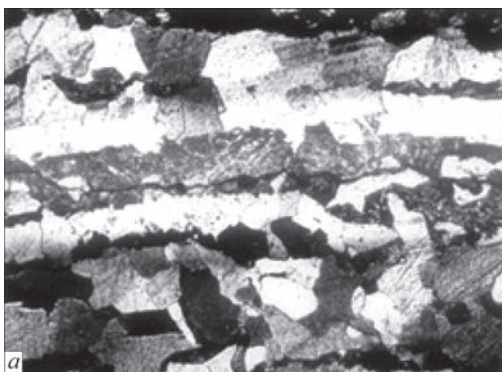


Рис. 11. Микротрещины в зоне темной полосы, заполненные неметаллическим веществом, обнаруженные только ЭМА дефектоскопом: а – $\times 300$; б – $\times 100$

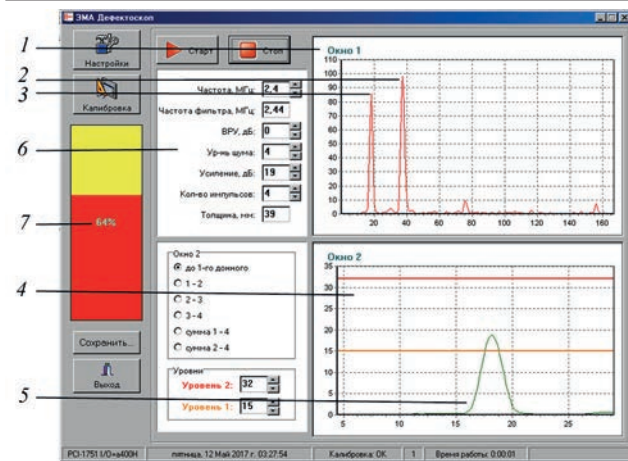


Рис. 12. Экран ЭМА дефектоскопа при обнаружении дефекта, эквивалентного плоскодонному отражателю диаметром 3 мм, в образце из ферромагнитной стали 09Г2С толщиной 39 мм (описание 1–7 см. в тексте)

падает, тогда как чувствительность ЭМА дефектоскопа сохраняется. При заполнении микротрещин в листе НВ, их выявляемость контактным дефектоскопом недостаточна. На рис. 11 показаны дефекты, которые были обнаружены только ЭМА дефектоскопом. С большой степенью вероятности можно считать, что такое положение обусловлено различием физических процессов прохождения продольных и сдвиговых волн через тонкие плоские дефекты.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что при контроле эхо-методом ЭМА дефектоскопом поперечными ультразвуковыми волнами выявляемость плоских дефектов выше, чем продольными волнами при контроле традиционным контактным дефектоскопом.

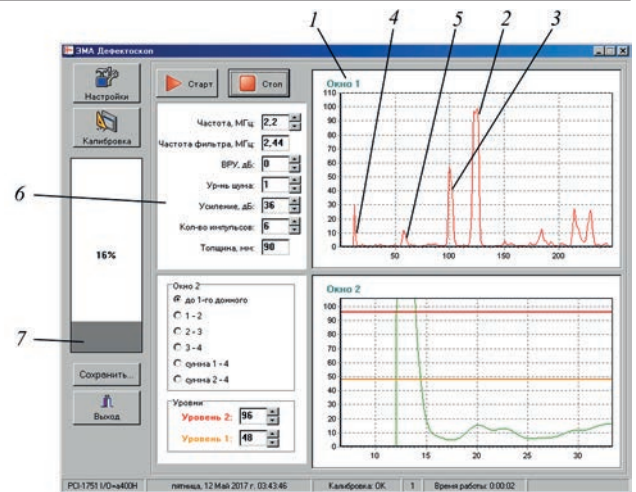


Рис. 13. Экран ЭМА дефектоскопа при обнаружении дефекта в образце из алюминия толщиной 120 мм: 1 – окно с временной разверткой; 2 – первый донный импульс; 3 – импульс от дефекта, эквивалентного плоскодонному отражателю диаметром 3 мм; 4 – «хвост» зондирующего импульса; 5 – импульс продольной волны; 6 – окно с основными параметрами контроля эхо-методом; 7 – номограмма отображающая величину ослабления донного сигнала при контроле зеркально-тепловым методом

В качестве примера высокой чувствительности на рис. 12 показан экран рабочего образца ЭМА дефектоскопа при обнаружении дефекта в образце из ферромагнитной стали 09Г2С толщиной 39 мм. На рис. 12 обозначено: 1 – окно с временной разверткой; 2 – первый донный импульс; 3 – импульс от дефекта, эквивалентного плоскодонному отражателю диаметром 3 мм; 4 – окно с временной разверткой после корреляционной обработки с использованием дополнительного метода, предложенного в работе [12]; 5 – импульс от дефек-

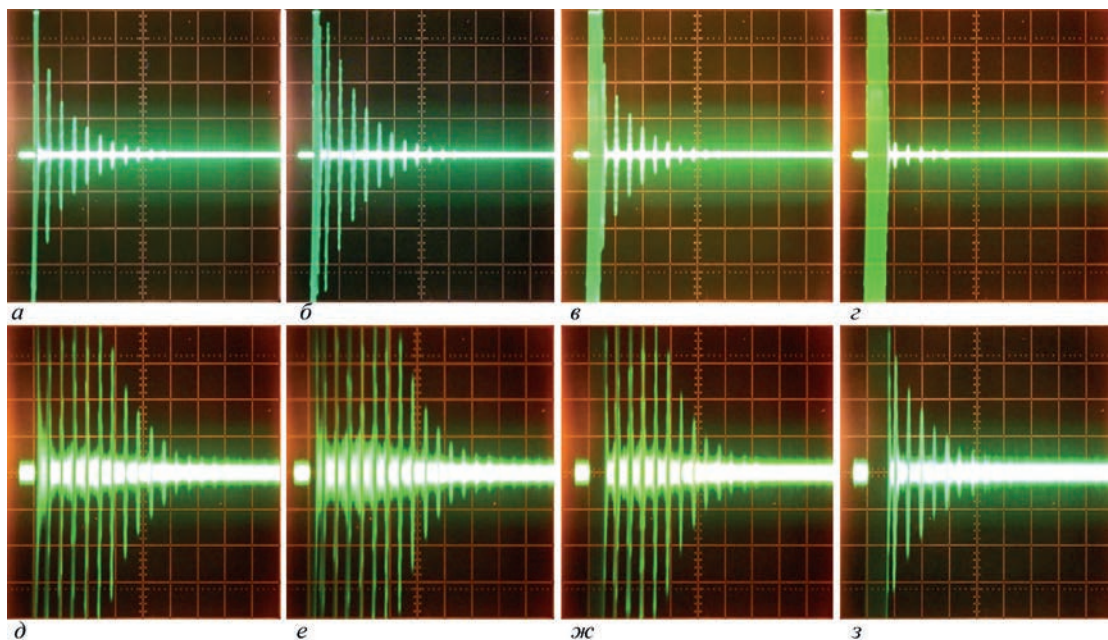


Рис. 14. Донные импульсы, отраженные из листового образца из стали 45 толщиной 32 мм, на поверхности которого имеется значительный слой окалины: а–г – развертка в масштабе 1В/деление; д–з – 0,1 В/деление экрана осциллографа; а, д – расстояние от протектора ЭМАП до поверхности металла 0 мм; б, е – 2; в, ж – 5; з, з – 10

та; 6 – окно с основными параметрами контроля эхо-методом; 7 – номограмма отображающая величину ослабления донного сигнала при контроле зеркально-теневым методом.

На рис. 13 показан экран рабочего образца ЭМА дефектоскопа при обнаружении дефекта в образце алюминия толщиной 120 мм.

Анализ данных, приведенных на рис. 12, 13, подтверждает высокую чувствительность ЭМА способа УЗК эхо-методом и зеркально-теневым методом.

Толщинометрия. При толщимоетрии изделий важное значение имеет величина донных сигналов, особенно для объектов с диэлектрическими покрытиями. Автором работы [13] разработана модель ЭМА толщиномера, предназначенная для контроля толщины металлоизделий с диэлектрическими покрытиями толщиной до 10 мм. При проведении исследований его чувствительности с поверхности образца окалина не зачищалась. Диэлектрическое покрытие имитировалось пластинами стеклотекстолита различных толщин. Результаты исследований, при расстояниях от проектора ЭМАП до поверхности металла от 0 до 10 мм, в виде сигналов с амплитудой, достаточной для измерения толщины, приведены на рис. 14 (обработка принятых сигналов не проводилась).

Из приведенных данных можно сделать вывод, что измерения толщины металлоизделий с достаточной чувствительностью можно выполнять через слой диэлектрического покрытия толщиной до 10 мм, т. е. без удаления покрытия.

Выводы

В результате анализа известных информационных источников установлено, что во многих случаях использование ЭМА дефектоскопов (при использовании зеркально-теневого и эхо-методов) и толщиномеров, по сравнению с традиционным контактным методом, позволяет выполнять высокочувствительный ультразвуковой бесконтактный контроль металлоизделий без зачистки поверхности и при значительных толщинах диэлектрических покрытий: краски, пластика, а также при наличии окисления.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что использование ЭМА дефектоскопов и толщиномеров обеспечивает возможность экономить энергию, металл, инструмент и время на проведение неразрушающего УЗК за счет исключения операций зачистки и восстановления покрытий.

Кроме того, по сравнению с традиционными методами контроля, исключается использование контактных жидкостей, также дает возможность экономить материалы и время на проведение не-

разрушающего УЗК. Улучшается экологическое состояние окружающей среды.

Список литературы

1. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. (2018) Чувствительность контроля электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 1). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 45–50, DOI:10.15407/tdnk2018.04.06
2. Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. О чувствительности ультразвукового контроля поверхностными волнами, возбуждаемыми и принимаемыми электромагнитно-акустическими преобразователями (Обзор, ч. 2). *Там же*, 1, 47–52, DOI:10.15407/tdnk2019.01.06
3. *Высокоэффективный ультразвуковой для машиностроения. Контроль листового проката и судностроения. Режим доступа: <http://aprioris.ru/about/blog/vysokojeffektivnyj-ultrazvukovoj-dlja-mashinostroenija.html>*
4. (2000) *Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України*. Дніпропетровськ, Арт-Прес.
5. (1983) ТУ 14-2-584-84. *Рельсы железнодорожные не термообработанные и поверхностно-закаленные, проконтролированные ультразвуковым методом в зоне, ограниченной толщиной шейки*. Харьков, УкрНИИМет.
6. (1983) ТУ 14-2-542-83. *Рельсы объемно-закаленные Р65, проконтролированные ультразвуковым электромагнитно-акустическим методом в зоне, ограниченной толщиной шейки*. Харьков, УкрНИИМет.
7. Сучков Г.М. (1988) *Разработка и внедрение технологии сплошного автоматического обнаружения дефектов макроструктуры объемнозакаленных рельсов бесконтактным ультразвуковым методом*: дис. ... канд. техн. наук. Харьков, УкрНИИМет.
8. Себко В.П., Сучков Г.М., Малахов А.В. (2004) Ультразвуковой контроль головки рельсов ЭМА способом. *Дефектоскопия*, 7, 17–25.
9. Сучков Г.М., Алексеев Е.А., Захаренко В.В. (2006) Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 29–34.
10. Сучков Г.М., Кагасонов Ю.А., Гарькавый В.В. (2000) Экспериментальные исследования чувствительности ЭМА преобразователей при дефектоскопии эхометодом сдвиговыми объемными волнами. *Дефектоскопия*, 2, 12–16.
11. Сучков Г.М., Михайлова И.В., Савон А.И., Ганжала А.Г. (2001) Исследование несплошностей в листах. *Там же*, 3, 83–87.
12. Serkov A., Breslavets V., Tolkachov M., Churyumov Issam Saad G. (2017) Noise-Like Signals in Wireless Information Transmission Systems. *Advanced Information Systems*, 2, 1, 33–38.
13. Десятніченко О.В. (2015) *Електромагнітно-акустичний товщиномір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, Моделіст.

References

1. Suchkov, G.M., Plesnetsov, S.Yu. (2018) Sensitivity of testing via electromagnetic-acoustic transducers (Review, p. 1). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 45-50 DOI:10.15407/tdnk2018.04.06 [in Russian].
2. Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Plesnetsov, S.Yu. (2019) About the sensitivity of ultrasonic testing by surface waves excited and received by electromagnetic-acoustic transducers (Review, p. 2). *Ibid.*, 1, 47–52, DOI:10.15407/tdnk2019.01.06 [in Russian].
3. *High-efficient ultrasonic testing for machine-building. Control of roll sheets in shipbuilding*. <http://aprioris.ru/about/blog/vysokojeffektivnyj-ultrazvukovoj-dlja-mashinostroenija.html>
4. (2000) *Classification and catalogue of defects and damage of elements of switches and rails in railways of Ukraine*. Dnipropetrovsk, Art-Pres [in Ukrainian].
5. (1983) TU 14-2-584-84: *Railway rails non heat-treated and surface hardened, tested by ultrasonic method in the zone limited by web thickness*. Kharkov, UkrNIIMet [in Russian].

6. (1983) TU 14-2-542-83: *Bulk-hardened rails tested by ultrasonic electromagneto-acoustic method in the zone limited by web thickness*. Kharkov, UkrNIIMet [in Russian].
7. Suchkov, G.M. (1988) *Development and implementation of the technology of continuous automatic detection of macrostructure defects in bulk-hardened rails by contact-less ultrasonic method*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kharkov, UkrNIIMet [in Russian].
8. Sebko, V.P., Suchkov, G.M., Malakhov, A.V. (2004) *Ultrasonic testing of rail heads by EMA method*. *Defektoskopiya*, 7, 17-25 [in Russian].
9. Suchkov, G.M., Alekseev, E.A., Zakharenko, V.V. (2006) *Energy- and resources-saving instruments and non-destructive testing technologies*. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 29-34 [in Russian].
10. Suchkov, G.M., Katasonov, Yu.A., Garkavyi, V.V. (2000) *Experimental investigations of sensitivity of EMA transducers in flaw detection by shear body wave echo method*. *Defektoskopiya*, 2, 12-16 [in Russian].
11. Suchkov, G.M., Mikhajlova, I.V., Savon, A.I., Ganzhala, A.G. (2001) *Examination of discontinuities in sheets*. *Ibid.*, 3, 83-87 [in Russian].
12. Serkov, A., Breslavets, V., Tolkachov, M., Churyumov, Issam Saad G. (2017) *Noise-like signals in wireless information transmission systems*. *Advanced Information Systems*, 2(1), 33-38.
13. Desyatnichenko, O.V. (2015) *Electromagnetic-acoustic thickness gauge for control of metal products with dielectric coatings*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kharkiv, Modelist [in Ukrainian].

ЧУТЛИВІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ЕМА ПРИ ВИЯВЛЕННІ ПРИРОДНИХ ВНУТРІШНІХ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛОВИРОБІВ. МОЖЛИВОСТІ ТОВЩИНОМЕТРІЇ.

(Огляд ч. 3)

Г.М. Сучков, О.Н. Петрищев, С.Ю. Плєснецов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Виконано аналіз інформаційних джерел, в яких наведено дані щодо чутливості ультразвукового неруйнівного контролю при виявленні природних внутрішніх дефектів металовиробів приладами та установками з електромагнітно-акустичними перетворювачами. Встановлено, що електромагнітно-акустичні пристрої вигідно відрізняються від традиційних тим, що вони забезпечують ефективне виявлення дефектів, які не дають відбитих сигналів, що мають малі розміри та несприятливу орієнтацію щодо напрямку поширення ультразвукових імпульсів. Нові електромагнітно-акустичні перетворювачі забезпечують вимірювання товщини з повітряними зазорами або діелектричними покриттями величиною до 10 мм. Бібліогр. 13, рис. 14.

Ключові слова: металовиріб, якість, дефект, електромагнітно-акустичний, перетворювач, дефектоскопія, чутливість контролю, товщинометрія

SENSITIVITY OF ULTRASONIC TESTING BY ELECTROMAGNETO-ACOUSTIC TECHNIQUE AT DETECTION OF NATURAL INTERNAL DEFECTS OF METAL PRODUCTS. POSSIBILITIES OF THICKNESS MEASUREMENT.

(Review p. 3)

G.M. Suchkov, O.N. Petrishchev, S.Yu. Plesnetsov

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». 2 Kirpichev Str., Kharkiv, Ukraine.
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

The paper provides analysis of information sources, giving data on sensitivity of ultrasonic non-destructive testing at detection of natural internal defects of metal products by instruments and devices with electromagneto-acoustic transducers. It is found that electromagneto-acoustic devices differ advantageously from the traditional ones in that they ensure effective detection of defects not generating reflected signals, having small dimensions and unfavourable orientation relative to the direction of ultrasonic pulse propagation. New electromagnetoacoustic transducers enable performance of thickness measurement with air gaps or dielectric coatings of up to 10 mm size. 13 Ref., 14 Fig.

Keywords: metal product, quality, electromagneto-acoustic, transducer, flaw detection, testing sensitivity, thickness measurement

Поступила в редакцію
18.03.2019



**Межотраслевой учебно-аттестационный центр
Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины**



Программы профессиональной подготовки на 2019 г.

| Шифр курса | Наименование программы | Сроки проведения |
|--|--|--|
| 421 | Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно ДСТУ EN 9712 | индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком |
| 423 | | |
| 427 | | |
| 430 | | |
| 433 | | |
| 436 | | |
| Украина, 03150, г. Киев, ул. Антоновича, 56. Тел.: (044) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09, факс: (044) 456-48-94 E-mail: paton_muac@ukr.net, http://muac.kpi.ua | | |

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ У ЗВАРЮВАННІ І СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ – POLYWELD 2019»

У період 23–24 травня 2019 р. у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» вдруге проходила Міжнародна конференція «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2019». Організатором заходу стала кафедра зварювального виробництва зварювального факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського. На конференції заслухані та обговорені 44 доповіді провідних вчених-фахівців з напрямку зварювання. Зокрема були представлені доповіді від ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Дослідницької мережі Лукасевич – Інститут зварювання, (м. Глівіце, Польща), Білоруського державного університету, Фізико-технічного інституту НАН Республіки Білорусь, Інституту тепло- та масообміну ім. О.В. Ликова НАН Республіки Білорусь,

Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона, Школи матеріалознавства та інженерії Шеньянського технологічного університету, Католицького університету Льовена (Бельгія), Інституту проблем матеріалознавства НАН України ім. І.М. Францевича, ЦНДІ ОВТ ЗСУ, НУОУ ім. Івана Черняхівського, Національного університету ім. Тараса Шевченка, Національного університету кораблебудування ім. адмірала Маркова, Національного університету «Запорізька політехніка», ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», ТОВ «Триада-зварювання», ТОВ «Плазер» та КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Цьогорічна конференція присвячена 125-річчю з дня народження видатного вченого – фахівця зі зварювання, академіка Хренова Костянтина Костянтиновича. Сучасні тенденції



Відкриває конференцію академік НАНУ І.В. Кривцун



Під час виступу С. Турика



Учасники Міжнародної конференції



Робочий фрагмент виступу Піскун Н.В.

у зварюванні та різносторонні наукові інтереси К.К. Хренова визначили спрямованість доповідей конференції. Були обговорені актуальні проблеми зварювання та суміжних технологій, у тому числі гібридних лазерно-дугових процесів зварювання, дисперсійного модифікування металу зварних швів, напружено-деформованого

стану зварних та паяних з'єднань, технологій плазмової обробки металів, застосування наноматеріалів у зварюванні та нанесенні покриттів, особливостей руйнування об'єктів при високошвидкісному динамічному навантаженні, електронно-променевого зварювання, створення нових зварювальних матеріалів, застосування математичного моделювання для аналізу фізико-хімічних і деформаційних процесів при зварюванні та споріднених технологіях, сучасних методів контролю якості виробів, санітарно-гігієнічної безпеки персоналу, адитивних технологій зварювання, технологій нанесення покриттів, тенденцій розвитку стандартизації в зварюванні та ін.

В ході обговорень учасники конференції визначили напрями подальшого розвитку досліджень за темами доповідей.

В.В. Квасницький

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И 3D-ТЕХНОЛОГИЙ»

4–5 июня 2019 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е.О. Патона прошла Международная научно-техническая конференция «Материалы для сварки, наплавки, нанесения защитных покрытий и 3D-технологий», организованная ИЭС им. Е.О. Патона, международными ассоциациями «Сварка», «Электрод» и Обществом сварщиков Украины. К началу работы конференции были изданы труды в виде специального выпуска журнала «Автоматическая сварка», №6, 2019 г.

В конференции приняли участие ученые, преподаватели и инженерно-технические специалисты НИИ, вузов, промышленных и коммерческих предприятий, представители ассоциаций из ряда городов Украины, а также зарубежные участники из Польши, Германии, Франции. Всего свыше 60 человек.

В перечень организаций и компаний, чьи специалисты приняли участие в конференции, вошли: ИЭС им. Е.О. Патона, ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона, ООО «ТМ Велтек», ООО «Сумы-Электрод», ООО «ВИТАПОЛИС», НТУУ «Киевский политехнический институт», Днепропетровский национальный университет, Институт черной металлургии НАН Украины, ГП «Ивченко-Прогресс», ООО «ПЛАН-Т», ООО «Аддитивные лазерные технологии Украины», ООО «Технологии высоких энергий», ООО «Зираст-Днепр», Днепропетровский ГТУ, ООО «ВАНТ», Институт сварки в Гливицах

(Польша), компании «Dr. Rosert RCT» (Германия), «Welding Alloys Group» (Франция) и другие.

На открытии конференции с приветствием выступил заместитель директора ИЭС им. Е.О. Патона по науке академик И.В. Кривцун. Он передал слова приветствия участникам конференции от имени академика Б.Е. Патона, кратко охарактеризовал основные тенденции на мировом рынке сварочных материалов и пожелал успешной и плодотворной работы конференции. Особо подчеркнута важность встреч и обсуждений специалистов в области сварочных материалов, помогающих повышать эффективность сварочного производства.

На конференции в пленарном режиме было заслушано 16 докладов по ряду актуальных для



Дискуссия во время доклада А.А. Мазура



Во время посещения ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона сварочного производства тем. Не останавливаясь подробно на каждом из них (как отмечалось, доклады вошли в выпуск журнала «Автоматическая сварка», №6, 2019 г.), отметим лишь те, которые вызвали наибольший интерес и по которым состоялась оживленная дискуссия. Так, в докладе А.А. Мазура (ИЭС им. Е.О. Патона) «Состояние и перспективы мирового рынка сварочных материалов» отмечено, что сварка в обозримой перспективе является базовой технологией во многих отраслях промышленности и строительства. Для промышленно развитых стран характерна достаточно устойчивая динамика развития сварочного производства и сварочного рынка, которая определяется стабильным ростом потребления конструкционных материалов и расширением их сортамента, а также появлением на сварочном рынке новых прогрессивных материалов, технологий и оборудования для сварки и связанных с ней процессов.

Р. Росерт (Германия) в докладе «Сварка и наплавка под флюсом высоколегированных сталей порошковыми проволоками» подробно остановился на нескольких примерах реализованных проектов

по изготовлению уникального сварочного оборудования. Отмеченные технологии сварки и наплавки сегодня эффективно используются для сварки всех классов высоколегированных сталей и сплавов, для наплавки сплавов на кобальтовой основе.

Е. Нагай (Польша) в докладе «Вопросы сертификации сварочных материалов в Польше и странах Европейского Союза» остановился на алгоритме действий любой компании, ставившей своей целью войти на европейский рынок. Он подробно осветил шаги, которые прошла Польша на пути экономического развития, позволившие стать ей равноправным членом ЕС.

Большой интерес вызвал доклад А.А. Кононенко (Днепропетровский национальный университет) «Исследование условий глубокого проплавления при изготовлении образцов из жаропрочного сплава Juconel 718 методом выборочного лазерного плавления». Этот метод (Selective Laser Melting) позволяет изготавливать сложнопрофильные изделия по компьютерной модели практически из любых металлических порошков.

Во время конференции была проведена выставка производителей сварочных материалов, в которой приняли участие ИЭС им. Е.О. Патона, ОЗСО им. Е.О. Патона, ООО «Сумы Электрод», ООО «ВИТАПОЛИС», ООО «ТМ Велтек», ООО «ПЛАН-Т».

Во время работы конференции и выставки состоялся ряд двухсторонних переговоров, направленных на кооперацию и дальнейшее сотрудничество, выполнению совместных проектов.

Во второй день конференции ее участники посетили Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е.О. Патона.

А.Т. Зельниченко,
В.Н. Липодаев

Подписка – 2019 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/
 Подписной индекс 74475

| Украина | | Зарубежные страны | |
|---|----------|-------------------|---------|
| на полугодие | на год | на полугодие | на год |
| 330 грн. | 660 грн. | 30 евро | 60 евро |
| В стоимость включена доставка заказной бандеролью | | | |



Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств ДП «Преса», «АС-Медиа», «ПресЦентр Киев», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий».

Контакты:
 Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-82-77
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 14.05.2019. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
 Печать ООО «ДИА».
 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.