

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
Б. Е. ПАТОН

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

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

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

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

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

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

В. В. Ключев  
ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин  
Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

Г. И. Прокопенко  
Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко  
Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

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

М. Г. Чаусов  
Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

В. Е. Щербинин  
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

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

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Борису Евгеньевичу Патону — 100!.....3

ПАТОН Б. Е. Современные исследования и разработки ИЭС  
им. Е. О. Патона в области сварки и родственных технологий.....5

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А. Оценка энергии, расходу-  
емой на образование повреждений при разрушении матери-  
алов, на основе данных акустической эмиссии ..... 19

СКАЛЬСКИЙ В. Р., МОКРЫЙ О. М. Влияние углублений  
поверхности элементов конструкций на измерение скорости  
поверхностных акустических волн ..... 24

ДОЛИНЕНКО В. В., ШАПОВАЛОВ Е. В., КУЦ Ю. В., РЕДЬКА М. А.,  
УЧАНИН В. Н. Моделирование переходных процессов в измери-  
тельном канале вихретокового дефектоскопа ..... 30

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

НЕДОСЕКА С. А., НЕДОСЕКА А. Я., ШЕВЦОВА М. А.,  
ГУРЬЯНОВ А. Н., ВАМБОЛЬ А. А. Акустическая эмиссия при  
испытании композитных материалов ..... 36

ДОЦЕНКО В. Н., НАВАЛЬНЕВ Н. И. Определение работоспособ-  
ности подшипника скольжения на основе контактного взаимо-  
действия ротора и вкладыша ..... 41

СУЧКОВ Г. М., ПЛЕСНЕЦОВ С. Ю. Чувствительность  
контроля электромагнитно-акустическими преобразователями  
(Обзор, ч. 1) ..... 45

КУЛИШ В. А., КРЫЛОВ Е. С. Особенности контроля  
технического состояния несущих конструкций железобетонных  
шахтных копров ..... 51

ИНФОРМАЦИЯ

Вторая конференция «Неразрушающий контроль в контексте  
ассоциированного членства Украины в ЕС» ..... 58

Межотраслевой учебно-аттестационный центр Института элек-  
тросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Программы профес-  
сиональной подготовки на 2019 г. .... 60

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78;

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики.

# ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА і НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

Виходить 4 рази на рік

# TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Quarterly issue

Головний редактор Б. Є. Патон

Editor-in-Chief B. E. Paton

## ЗМІСТ

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Борису Євгеновичу Патону — 100! ..... 3

*ПАТОН Б. Є.* Сучасні дослідження та розробки ІЕЗ ім. Є. О. Патона в галузі зварювання та споріднених технологій ..... 5

*НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А.* Оцінка енергії, що витрачається на утворення пошкоджень при руйнуванні матеріалів, на основі даних акустичної емісії ..... 19

*СКАЛЬСЬКИЙ В. Р., МОКРИЙ О. М.* Вплив заглиблень поверхні елементів конструкцій на вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль ..... 24

*ДОЛИНЕНКО В. В., ШАПОВАЛОВ Є. В., КУЦ Ю. В., РЕДЬКА М. О., УЧАНІН В. М.* Моделювання перехідних процесів у вимірювальному каналі вихрострумового дефектоскопу ..... 30

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

*НЕДОСЕКА С. А., НЕДОСЕКА А. Я., ШЕВЦОВА М. А., ГУРЬЯНОВ О. М., ВАМБОЛЬ О. О.* Акустична емісія при випробуванні композитних матеріалів ..... 36

*ДОЦЕНКО В. М., НАВАЛЬНЄВ М. І.* Визначення працездатності підшипника ковзання на основі контактної взаємодії ротора та вкладиша ..... 41

*СУЧКОВ Г. М., ПЛЕСНЕЦОВ С. Ю.* Чутливість контролю електромагнітно-акустичними перетворювачами (Огляд, ч. 1) ..... 45

*КУЛІШ В. А., КРИЛОВ Е. С.* Особливості контролю технічного стану несучих конструкцій залізобетонних шахтних копрів ..... 51

### ІНФОРМАЦІЯ

Друга конференція «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в ЄС» ..... 58

Міжгалузевий навчально-атестаційний центр Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Програми професійної підготовки на 2019 р ..... 60

#### Адреса редакції

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

## CONTENTS

### SCIENTIFIC-TECHNICAL

Boris Paton — 100! ..... 3

*PATON B. E.* Advanced studies and developments of the E. O. Paton Electric Welding Institute in the field of welding and related technologies ..... 5

*NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A.* Evaluation of energy consumed in damage initiation at fracture of materials, based on acoustic emission data ..... 19

*SKALSKII V. R., MOKRYI O. M.* Influence of depressions on the surface of structural elements on measurement of the velocity of surface acoustic waves ..... 24

*DOLINENKO V. V., SHAPOVALOV E. V., KUTS Yu. V., REDKA M. A., UCHANIN V. N.* Modeling the transient processes in measurement channel of eddy-current flaw detector ..... 30

### INDUSTRIAL

*NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A. Ya., SHEVTSOVA M.A., GURYANOV A.N., VAMBOL A.A.* Acoustic emission at composite material testing ..... 36

*DOTSENKO V.N., NAVALNEV N.I.* Determination of serviceability of slide bearing based on contact interaction of the rotor and insert ..... 41

*SUCHKOV G. M., PLESNETSOV S. Yu.* Sensitivity of testing via electromagnetic-acoustic transducers (Overview, p. 1) ..... 45

*KULISH V. A., KRYLOV E. S.* Features of monitoring the technical condition of load-carrying structures of concrete shaft headgears ..... 51

### INFORMATION

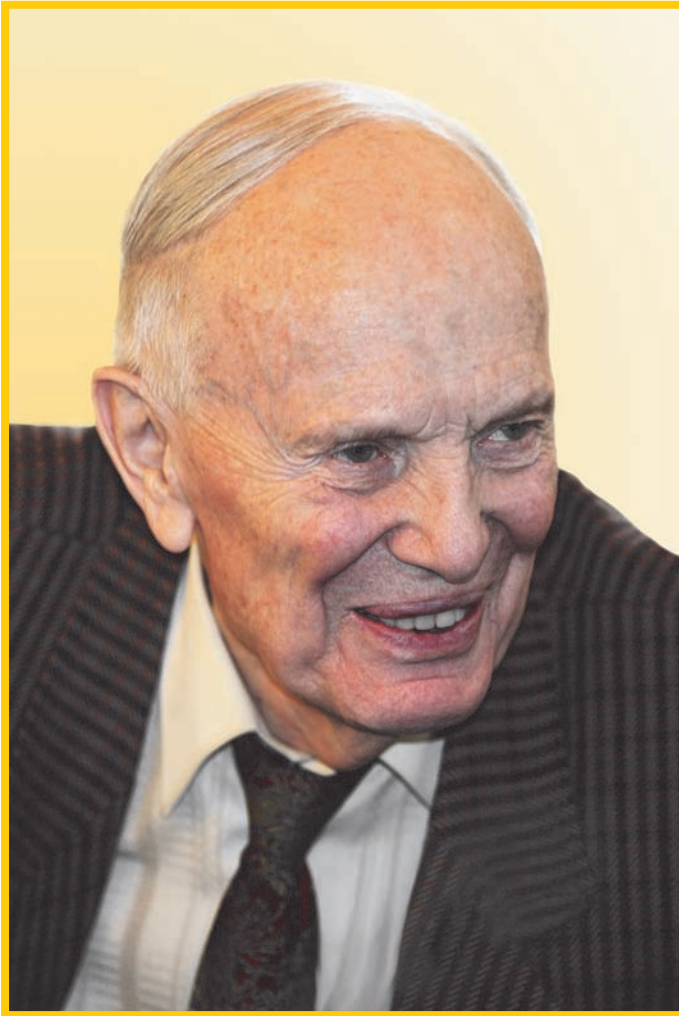
Second Conference «Nondestructive Testing in the context of associated membership of Ukraine in EC» ..... 58

Interbranch Training-Certification Center of the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. Professional Training Programs for 2019 ..... 60

#### 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

## Борису Євгеновичу Патону — 100!



Академік Борис Євгенович Патон

Нам випала велика честь працювати разом із академіком Борисом Євгеновичем Патоном, який своєю самовідданою працею доклав чималих зусиль у розбудову Академії наук України, заснованої у 1918 р. з ініціативи видатного вченого та громадського діяча Володимира Івановича Вернадського.

За роки своєї діяльності Академія досягла значних успіхів у багатьох галузях науки і техніки. Зроблено чимало відкриттів і винаходів, висунуто багато теорій і концепцій, започатковано наукові і технічні напрями, сформовано всесвітньовідомі наукові школи, до яких належить і Патонівська школа, що виростила й об'єднала вчених в галузі електрозварювання та споріднених технологій, матеріалознавства, металургії.

Все трудове життя Бориса Євгеновича нерозривно зв'язане з Інститутом електрозварювання. Це — і поклики «технічної вдачі», і сімейна традиція, і обов'язок сина продовжити справу батька.

Талант видатного вченого з широким колом інтересів з особою силою проявився у Бориса Євгеновича на посту директора Інституту. Чітко і ясно визначити мету дослідження, побачити у ньому найважливішу ланку, захопити новим напрямом великий колектив наукових співробітників — ось основні завдання наукового керівника, з якими він блискуче впорався, виявивши виняткове вміння працювати з колективом; готовність підтримати будь-яку цікаву

ідею, гідно оцінити виконану роботу. Його невичерпний ентузіазм, рідкісна працездатність і уважність до кожного співробітника забезпечили в колективі здорову творчу атмосферу.

Вже понад 65 років робота Інституту під керівництвом Бориса Євгеновича є чудовим продовженням і втіленням мудрих і далекоглядних принципів науково-технічної діяльності засновника нашого інституту — Євгена Оскаровича Патона. Започатковані Борисом Євгеновичем нові науково-технічні напрями значно розширили тематику досліджень і розробок. Розгорнуті в Інституті цілеспрямовані фундаментальні дослідження стали теоретичною основою науки про зварювання, перетворили його на потужне знаряддя технічного прогресу, що призвело до революційних зрушень у багатьох галузях промисловості — машино-, судно-, авіабудуванні, ракетно-космічній галузі, енергетиці, залізничному транспорті, гірничо-промисловому комплексі, металургії й хімічному виробництві, сприяли створенню трубопровідного транспорту, будівельної індустрії. Багато наукових розробок визначили світовий розвиток зварювальних технологій й увійшли в історію прогресу науки і техніки.

Світовий авторитет Б. Є. Патону принесла різнобічна та надзвичайно плідна наукова й інженерна діяльність, прагнення спрямувати фундаментальні наукові дослідження на вирішення актуальних проблем науково-технічного прогресу. Своїми працями він заклав основи дугового зварювання, а саме теорії автоматів для дугового зварювання, яка в подальшому була розвинена багатьма фахівцями в галузі автоматичного управління процесами зварювання. Під керівництвом Бориса Євгеновича здійснено дослідження в галузі зварювальних джерел живлення; створено процеси дугового, електрошлакового, контактного, електронно-променевого та багатьох інших процесів зварювання і споріднених технологій; виконано великий комплекс фундаментальних і прикладних досліджень у галузі статичної та циклічної міцності зварних з'єднань, їхнього опору крихким і втомним руйнуванням, працездатності в умовах низьких температур.



Вперше в Україні створені системи діагностики зварних конструкцій, до яких ставляться підвищені вимоги безпеки експлуатації. Борис Євгенович очолює дослідження з використання електродугового процесу для покращення якості металів і сплавів, у результаті чого з'явився принципово новий напрям у металургії — електродугове переплавлення і лиття. Розроблені в Інституті технології електродугового переплавлення знайшли широке застосування і здобули світове визнання.

Б. Є. Патон — учений-новатор. Технології, розроблені під його керівництвом, успішно працюють на землі, під водою і у космосі. Він запропонував використовувати методи зварювання для з'єднання живих тканин. Очолюваний академіком Б. Є. Патоном Інститут електродугового зварювання імені Євгена Оскаровича Патона Національної академії наук України — це потужна наукова установа, де народилось і зросло не одне покоління науковців-зварників. Борис Євгенович виховав сотні талановитих учених та інженерів.

Глибоке розуміння ролі науки у суспільстві, її цілей і завдань, високий міжнародний авторитет ученого, відданість науці, невичерпна енергія та високі моральні якості, активна громадсько-політична діяльність, досвід керівництва великим науковим колективом стали вирішальними аргументами в обранні Бориса Євгеновича на посаду президента Академії наук УРСР у 1962 р. (нині Національної академії наук України). Відтоді він протягом 56 років очолює цю провідну наукову організацію України.

На відповідальному посту президента Національної академії наук України ще більше розкрився його талант видатного організатора. За його участю розроблена нова структура Академії наук, її новий статут, що спрямований на найраціональніше використання наукових сил і засобів, їхню концентрацію при вирішенні найважливіших фундаментальних та прикладних наукових проблем, які мають важливе значення для економіки країни, створені десятки нових інститутів і організацій, що розвинули і поглибили дослідження у найважливіших наукових напрямках.

Видатні здібності Бориса Євгеновича як лідера, ученого і організатора розкрилися у драматичні дні Чорнобильської трагедії. Колективи багатьох інститутів Академії наук України, її Президія вже з перших днів включилися у роботу з ліквідації наслідків катастрофи.

Борис Євгенович Патон чимало зробив для розвитку міжнародного наукового співробітництва України, входження вітчизняної науки до європейського і світового наукового простору. За його ініціативою у 1993 р. була створена Міжнародна асоціація академії наук, яка об'єднала національні академії 15 країн Європи та Азії. Протягом майже 25 років Борис Євгенович був беззмінним президентом цієї Асоціації.

Борис Євгенович — відомий державний і громадський діяч. Багато разів він обирався до складу вищих органів державної влади, був і нині є керівником та членом різних комітетів і комісій. Обіймаючи високі посади, він плідно працює з глибоким почуттям особистої відповідальності перед державою, народом, власною совістю.

Академік Борис Євгенович Патон — творча особистість, мудра, глибоко порядна і доброзичлива людина, йому притаманні фантастична енергія, працездатність, гострий аналітичний розум. Його життєвий досвід, глибокі знання у багатьох галузях науки і техніки, міжнародний авторитет у науці й суспільстві відіграли велику роль у збереженні вітчизняного наукового потенціалу у перші, нелегкі десятиріччя незалежності України.

Символічно, що Борис Євгенович Патон народився в день заснування Національної академії наук України — 27 листопада 1918 р. У 1998 р. при святкуванні восьмидесятиріччя академії та її президента величезний зал палацу «Україна» овацією зустрів повідомлення про присвоєння Б. Є. Патону, першому в державі, звання Героя України. Наразі Борис Євгенович продовжує спрямовувати зусилля вчених Національної академії наук України, усього вітчизняного наукового співтовариства на розвиток науки, освіти, культури, забезпечення динамічного розвитку Батьківщини.

Природний талант Бориса Євгеновича, колосальна воля і невтомна, самовіддана праця забезпечили успіх на усіх етапах життя. І нині, в рік свого славетного ювілею, він зберігає звичну робочу форму, керує дослідженнями, ініціює науковий пошук, орієнтує на нові здобутки і широке входження Академії в світовий науковий простір.

Від щирого серця побажаємо ювіляру міцного здоров'я  
і нових здобутків у натхненній праці на науковій ниві.

Редколегія журналу

# СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКИ ІЕЗ ім. Є. О. ПАТОНА В ГАЛУЗІ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Б. Є. ПАТОН**

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

Представлено ряд нових розробок Інституту електрозварювання, створених останнім часом, а саме, технології та обладнання для зварювання із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії — плазми, лазера, електронного променя. Створено технології для зварювання труб, титану великих товщин, алюмінієво-літєвих сплавів, високоміцних сталей. Розроблено парофазні технології отримання наноструктурованих матеріалів для зварювання композитних матеріалів та інтерметалідів. Створено технології та обладнання для зварювання та різання під водою, новий електронно-променевий інструмент для зварювальних робіт у відкритому космосі. Для підвищення довговічності та надійності зварного шва запропонована післязварювальна обробка — імпульсами електричного струму високої щільності та високочастотне механічне проковування. Для контролю якості зварних конструкцій створено цифрове обладнання на основі високочутливих твердотільних перетворювачів, а для виробів складної геометрії — промисловий робот з системою технічного зору. Розроблено новий спосіб вирощування монокристалів тугоплавких металів. Представлено нову апаратуру для зварювання живих тканин. Бібліогр. 28, табл. 2, рис. 25.

*Ключові слова*: зварювання плазмове, лазерне, електронно-променеве, контактне, титан, алюмінієво-літєві сплави, міцність, контроль якості, наплавлення, монокристали, зварювання живих тканин

Зварювання і споріднені технології нині постійно і стабільно розвиваються. З їх застосуванням промислово розвинені країни світу виробляють більше половини свого валового національного продукту. Впевнено рухаючись вперед, зварювання увійшло в усі сфери життя людини. Воно широко використовується не тільки в промисловості та будівництві, а також й у виробництві побутової техніки, спортивного інвентаря, створенні виробів образотворчого мистецтва та навіть медицині. Все це дозволяє світовому зварювальному товариству констатувати, що сучасні технології зварювання не тільки застосовуються у матеріальному виробництві продукції, але й впливають на підвищення якості життя людини та сприяють досягненню сталого розвитку сучасного суспільства.

Аналіз тенденцій розвитку глобального ринку зварювальної техніки свідчить, що і надалі технології зварювання будуть найбільш поширені. Значно зростатимуть потреби в енергозберігаючих технологіях зварювання, що базуються на використанні висококонцентрованої енергії — плазмової, лазерної, електронно-променевої, а також гібридних джерел енергії. Автоматизація та роботизація процесів зварювання поширюватиметься і стане у нагоді там, де вона найбільш ефективна. Застосування нових конструктивних форм дозволить удосконалити зварні конструкції, а зниження їх металоємності забезпечить використання сталей і сплавів більш високої міцності. Проте не треба забувати про вимоги надійності, довговічності та якості зварних конструкцій.

Перспективними є дослідження та розробки Інституту електрозварювання, які виконано в останні роки з урахуванням тенденцій розвитку сучасних напрямків зварювальної науки і техніки.

Плазма як висококонцентроване джерело енергії знаходить все більше застосування у зварюванні та споріднених технологіях. В Інституті електрозварювання (ІЕЗ) здійснено ряд розробок, які дали гарні результати. Підвищити технологічні і техніко-економічні показники процесу зварювання товстого металу дозволила розроблена технологія швидкісного плазмового зварювання сплавів товщиною до 12 мм за один прохід і зварювальне обладнання — зварювальні плазмотрони оригінальної конструкції, плазмовий модуль, система керування за допомогою програмованого логічного контролера з можливістю інтеграції зі зварювальним роботом. Обладнання забезпечує можливість роботи з різнополярними імпульсами струму з заданою формою хвилі, з плавним регулюванням і дискретним регулюванням тривалості імпульсів та пауз між ними в широкому діапазоні, а також можливість роботи на постійному та імпульсному струмі прямої та зворотної полярності. У порівнянні з традиційним процесом дугового ТГ зварювання шов, отриманий плазмовим зварюванням, має на 40 % меншу ширину та масу металу, що наплавляється, а також більш дрібнодисперсну та однорідну структуру зони сплавлення. При цьому величина погонної енергії зменшується в 2,5...3,0 рази, а зона знеміцнення — в 1,5.

Значним досягненням останніх років є створення гібридного плазмово-дугового зварювання [1, 2]. Об'єднання двох зварювальних джерел

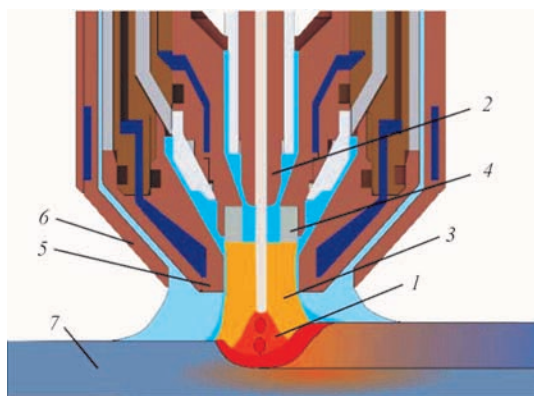


Рис. 1. Схема гібридного зварювального плазмотрона: 1 — дуга плавкого електрода; 2 — мундштук плавкого електрода; 3 — стиснута дуга прямої дії; 4 — трубчатий електрод плазмотрона; 5 — плазмостворююче сопло; 6 — захисне сопло; 7 — зварюваний зразок

живлення забезпечує більшу глибину проплавлення основного металу. Розроблена технологія зварювання сталей та алюмінієвих сплавів завтовшки 5...12 мм дозволяє у порівнянні з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом збільшити швидкість зварювання на 25...40 %, зменшити витрати зварювального дроту на 40 %. Для реалізації цієї технології створено плазмотрон оригінальної конструкції (рис. 1) та базові технологічні процеси.

Забезпечити високі фізико-механічні властивості зварних швів алюмінієвих сплавів дозволяє створена технологія точкового плазмового зварювання зі спеціальною формою імпульсу та стабілізацією його довжини і обладнання для її реалізації. У порівнянні з точковим контактним зварюванням тиском ця технологія може використовуватись при односторонньому доступі до міс-

ця зварювання. Катодне очищення зварюваних поверхонь алюмінієвих сплавів, висока продуктивність, менші енерговитрати дозволяють інтегрувати її у роботизовані зварювальні лінії.

Із застосуванням плазмових джерел енергії в Інституті створено процес високопродуктивного надзвукового плазмового напилення покриттів з порошків металу, сплавів, керамічних матеріалів та їх сумішей. Для його реалізації створено обладнання нового покоління (рис. 2), в якому передбачена можливість роздільної подачі компонентів дешевого плазмоутворюючого газу на основі повітря з домішками метану або пропану в кількості 5...10 %. Плазмотрон, генеруючи надзвуковий струмінь, збільшує кінетичну енергію часток, що напилюються, у 9...16 разів і, як наслідок, забезпечує значне збільшення усіх службових властивостей покриттів. Зокрема, міцність зчеплення збільшується в 1,5...2,0 рази в порівнянні з покриттями, що створюються плазмовим напиленням при дозвукових режимах.

Традиційно в Інституті продовжуються дослідження і розробки з використанням лазерних та електронно-променевих джерел живлення. На основі сучасних волоконних дискових та діодних лазерів високої надійності створено технологію і автоматизоване обладнання для лазерного зварювання високоміцних та нержавіючих сталей, алюмінієвих та титанових сплавів, які використовуються для виготовлення цілої гами виробів. Наприклад, для зварювання тонкостінних труб різного діаметру з нержавіючих сталей для виробництва багат шарових сильфонів (рис. 3). Створене лазерне зварювальне обладнання вели-



Рис. 2. Обладнання для високопродуктивного надзвукового плазмового напилення



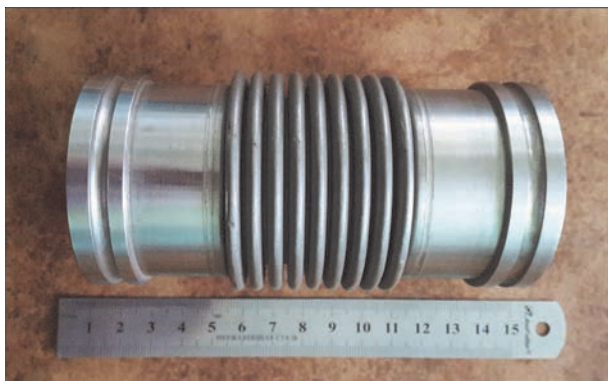


Рис. 3. Багатошаровий сиффон, виготовлений з труб, що зварені лазерним випромінюванням

кої потужності з успіхом застосовується у вагоно-, авто- та кораблебудуванні, а для монтажних робіт в цих галузях створено напівавтоматичний лазерний інструмент потужністю до 2 кВт (рис. 4).

На українських та закордонних авіа- і ракетобудівельних підприємствах пройшли промислові випробування розробки Інституту в галузі лазерного зварювання, зокрема, для зварювання різнорідних матеріалів, стрингерних панелей, сопел РРД, аерокосмічних стерен, тонкостінних корпусних конструкцій та інших елементів літальних апаратів.

У створенні обладнання для електронно-променевого зварювання ІЕЗ займає одне з провідних місць. Його продукція експортується до багатьох країн світу. В Інституті розроблено і виготовляється обладнання для електронно-променевого зварювання, яке умовно можна розділити на декілька типів за габаритами камер, а саме: малі ( $0,26 \dots 5,7 \text{ м}^3$ ), середні ( $19 \dots 42 \text{ м}^3$ ) та великі ( $80 \dots 100 \text{ м}^3$ ) (рис. 5). Від конкретного завдан-



Рис. 4. Напівавтоматичний лазерний інструмент

ня замовника визначається тип камери та розробляється відповідна технологія зварювання [3]. Камери мають механічне обладнання з рухомою електронно-променевою зварювальною гарматою на прецизійному багатоосьовому механізмі переміщення. Цей механізм з числовим програмним керуванням забезпечує керований лінійний рух гармати повз трьох координатних осей, а також поворот гармати на  $0 \dots 90^\circ$  у площині Z-X (від вертикальної орієнтації до горизонтальної). Обертання деталі забезпечується прецизійними зварювальними маніпуляторами з горизонтальними та вертикальними осями обертання. Найбільшу технологічну гнучкість забезпечує маніпулятор з похилою віссю обертання, який здійснює

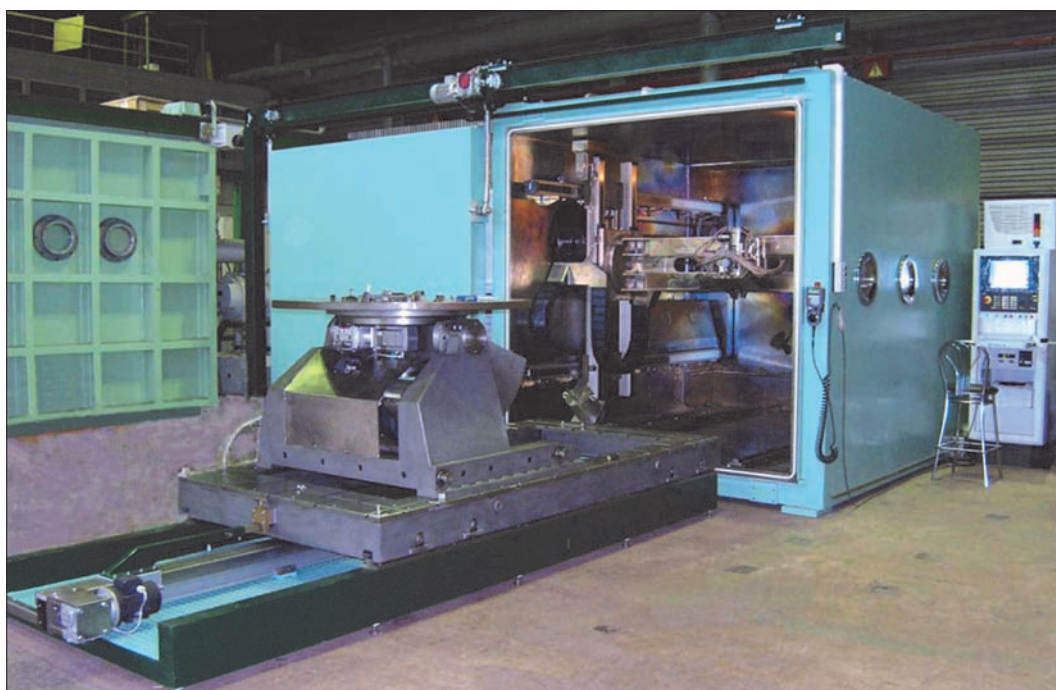


Рис. 5. Типова середньогабаритна камера з мобільною зварювальною гарматою та викатний робочий стіл



Рис. 6. Зварна заготовка секції авіаційного двигуна з титанового сплаву ВТ6

електронно-променеве зварювання, наприклад, складних концентричних секцій авіаційних двигунів (рис. 6) або авіаційних вузлів із змінною геометрією.

В залежності від конкретного призначення камера комплектується високовольтними інверторними джерелами живлення потужністю 15, 30 та 60 кВт та системою вторинно-емісійної електронної візуалізації «РАСТР», яка формує відображення зони зварювання перед, під час та після завершення зварювання. Це обладнання для електронно-променевого зварювання має сучасну систему керування із взаємодією користувача з устаткуванням виключно через Windows — орієнтований графічний інтерфейс [4].

Інститут має успішний великий досвід створення електронно-променевого обладнання та технологій космічного призначення. Проведені роботи щодо створення нового покоління електронно-променевого інструмента для зварювання при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт у відкритому космосі (рис. 7). Інструмент оснащений тріодною електронно-променевою гарматою потужністю до 2,5 кВт, відокремленою від високовольтного джерела живлення. Таке конструктивне рішення та використання для живлення гнучкого високовольтного кабеля з компактным високовольтним роз'ємом дозволило суттєво зменшити габарити та масу інструмента, а також збільшити його маневреність при здійсненні технологічних процесів. Збільшено також ресурс безперервної роботи та експлуатаційна надійність інструмента. Є можливість отримати гостросфокусований промінь діаметром  $\leq 0,6$  мм. Маса гармати складає 3 кг. Інструмент може працювати в ручному та автоматичному режимах з використанням робототехнічного устаткування або маніпуляторів.



Рис. 7. Ручна електронно-променева гармата з високовольтним роз'ємом

Традиційно Інститут приділяє значну увагу проблемі виробництва та зварювання труб. В останні роки проведені дослідження та створені технології і обладнання для пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) неповоротних з'єднань труб з товщиною стінок до 10 мм і діаметром до 200 мм з високоміцних сталей. Фізична суть процесу ПЗМД характеризується тим, що дуга під впливом зовнішнього магнітного поля, яке створюється магнітними системами, переміщується в щилині між торцями труб, що зварюються. Зварне з'єднання формується під час тиску та спільної пластичної деформації торців труб. Домінуючим фактором, який створює з'єднання, є наявність шару розплаву на початку періоду осадки.

В табл. 1 представлено механічні властивості зварних з'єднань труб різних розмірів та марок сталей. Вони відповідають вимогам міжнародних стандартів для газопроводів. Розроблені технології та устаткування знайшли широке застосування в промисловості при забезпеченні зварювання у польових та стаціонарних умовах.

Підводне зварювання — один із напрямків досліджень і розробок Інституту, де наші вчені зробили значні науково-технічні прориви, зокрема, у галузі створення зварювальних матеріалів. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження особливостей горіння дуги під водою та умов забезпечення сталого дугового процесу за різним гідростатичним тиском дозволили створити нові порошкові драти та електроди для так званого мокрого зварювання маловуглецевих, низьколегованих сталей та сталей підвищеної міцності [5].

Для дугового різання сталей і сплавів під водою на глибині до 200 м створені електроди та порошковий дріт, а також новий тип напівавто-



Таблиця 1. Механічні властивості зварних з'єднань труб

Марка сталі	Розмір труб, мм	Основний метал $\sigma_B$ , МПа	Зварне з'єднання $\sigma_B$ , МПа	Основний метал $KCV_{20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Зварне з'єднання $KCV_{20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Основний метал $KCV_{-20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Зварне з'єднання $KCV_{-20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Зварне з'єднання $KCV_{-40}$ , Дж/см <sup>2</sup>
09Г2С	42 ( $\delta=5$ )	$\frac{460...478}{469}$	$\frac{453...478}{465}$	$\frac{57...59}{58}$	$\frac{59...78,1}{68,5}$	$\frac{57,8...58}{57,9}$	$\frac{64...74,5}{69,3}$	—
35	89 ( $\delta=10$ )	$\frac{538...565}{551}$	$\frac{528...554}{541}$	$\frac{56...64}{60}$	$\frac{52...96,5}{70}$	—	—	—
01Star520	191 ( $\delta=7$ )	$\frac{638...665}{651}$	$\frac{618...674}{656}$	$\frac{116...154}{135}$	$\frac{87...152}{119}$	—	—	—
STRG410	60,5 ( $\delta=5,5$ )	$\frac{452...464}{458}$	$\frac{450...462}{456}$	$\frac{90...98}{94}$	$\frac{86...92}{89}$	$\frac{102...104}{98}$	$\frac{87...94}{91}$	$\frac{88...94}{92}$

мату (рис. 8), подавальний механізм якого знаходиться під водою поруч з водолазом-зварником [6]. Виконані дослідження механічних властивостей металу швів (рис. 9), результати яких представлені в табл. 2, довели високу якість робіт, що виконуються запропонованою технологією підводного зварювання — металоконструкції надійно працюють десятки років. Порівняння результатів показників міцності зварних з'єднань при циклічному навантаженні показало, що вони не поступаються з'єднанням, виконаним за звичайних умов (рис. 10).

Титан — один із основних сучасних конструкційних матеріалів, що використовується у ба-

Таблиця 2. Механічні властивості металу швів, виконаних під водою (ANSI/AWSD3.6, клас А)

Матеріал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCV_{-20}$ , Дж/см <sup>2</sup>
Електроди	$\geq 460$	$\geq 600$	$\geq 29$	$\geq 47$	$\geq 100$
Порошковий дріт	$\geq 350$	$\geq 550$	$\geq 30$	$\geq 60$	$\geq 80$
Сталь Х60	435	580	18	—	60

гатьох галузях промисловості при створенні відповідальних конструкцій. Починаючи із розробки технології зварювання листового титану малих

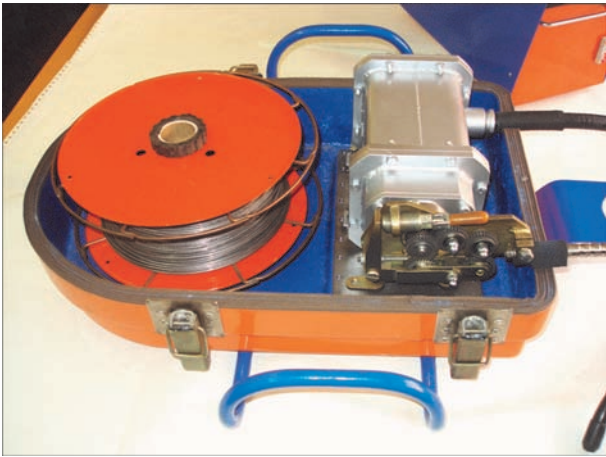


Рис. 8. Напівавтомат для підводного зварювання і різання порошковим дротом на глибині до 200 м

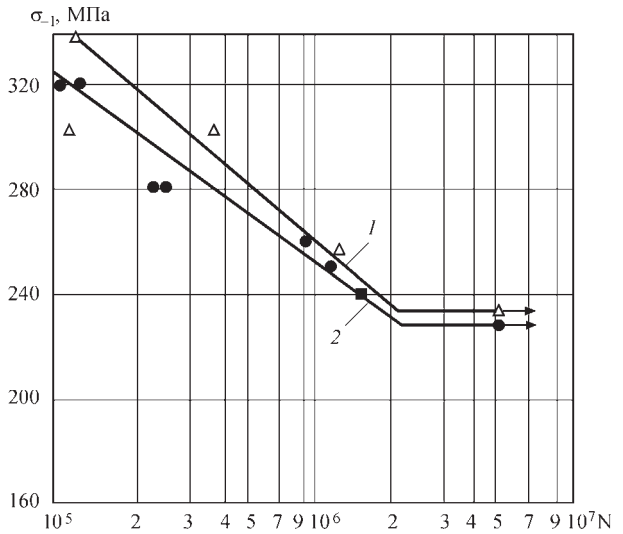


Рис. 10. Втомна довговічність при знакозмінному згинанні: 1 — зварювання під водою; 2 — зварювання на повітрі

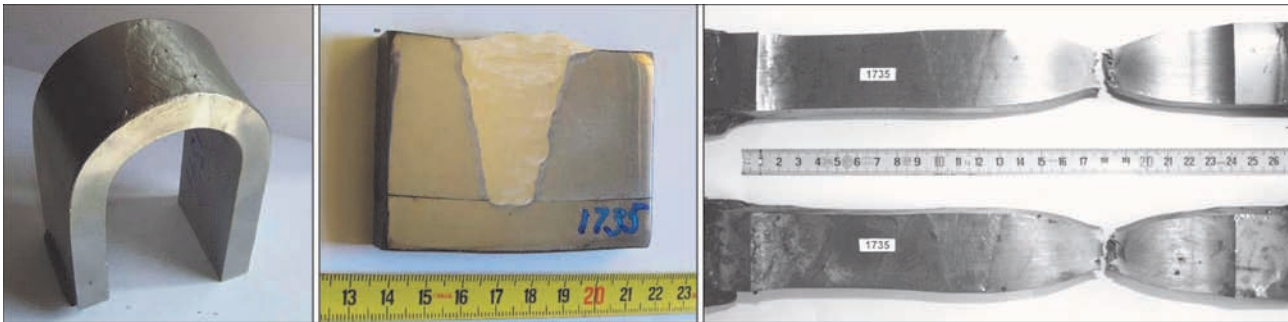


Рис. 9. Макрошліф та зразки після механічних випробувань (товщина металу 40 мм)



Рис. 11. Зварювальне обладнання УД 682 для зварювання і наплавлення деталей товщиною до 110 мм та довжиною до 4 м (а) та макрошліф зварного з'єднання (б)

товщин на початку 1950-х років Інститут постійно і всебічно займається дослідженням проблем зварювання титану. В Інституті успішно розроблено технології зварювання виробів із титану середніх і великих товщин вольфрамовим електродом у вузьке розкриття крайок. Цю технологію вирізняють такі переваги, як економічна витрата зварювального дроту, мала ширина шва та зони термічного впливу, зменшення кутових деформацій та залишкових зварювальних напружень. Для гарантованого сплавлення бокових стінок зварним швом застосовано кероване змінне магнітне поле. Створено установку УД 682 (рис. 11) для зварювання та наплавлення з'єднань товщиною до 110 мм та довжиною до 4 м. Із застосуванням цього обладнання зварено титанові сплави ПТЗВ, ВТ6, ВТ20 різної товщини. Дослідження зварних з'єднань підтвердили їх високу якість. Рівень міцності зварних

з'єднань титану ВТ6 із застосуванням зварювального присадного титанового дроту СПТ2 складає 95 % від міцності основного металу, а в'язкість  $KCU$  металу шва — 85 Дж/см<sup>2</sup>. Вміст домішок газів в металі шва знаходиться на рівні їх вмісту у присадному дроті, що підтверджує високу якість газового захисту.

Титанові сплави знайшли широке застосування при виготовленні конструкцій у авіаційній та космічній галузях. В Інституті проведено комплекс досліджень щодо розроблення технології бездеформаційного зварювання стрингерних панелей з високоміцного титанового сплаву ВТ20 із забезпеченням їх високої точності і міцності при циклічних навантаженнях. Доведено, що виконання проплавних швів аргонодуговим зварюванням неплавким електродом по шару активуючого флюсу з використанням попереднього пружного де-

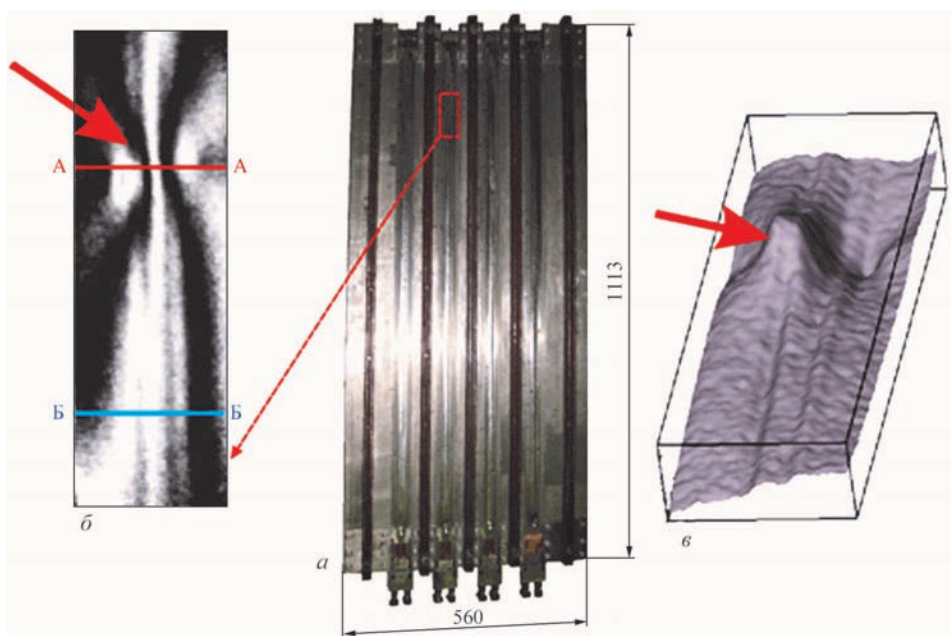


Рис. 12. Неруйнівний контроль якості стрингерної панелі зі сплаву ВТ20 методом електронної ширографії: а — панель у механічній оснастці після зварювання; б — картина інтерференційних ліній на ділянці, що досліджується; в — тривимірна картина деформованої поверхні

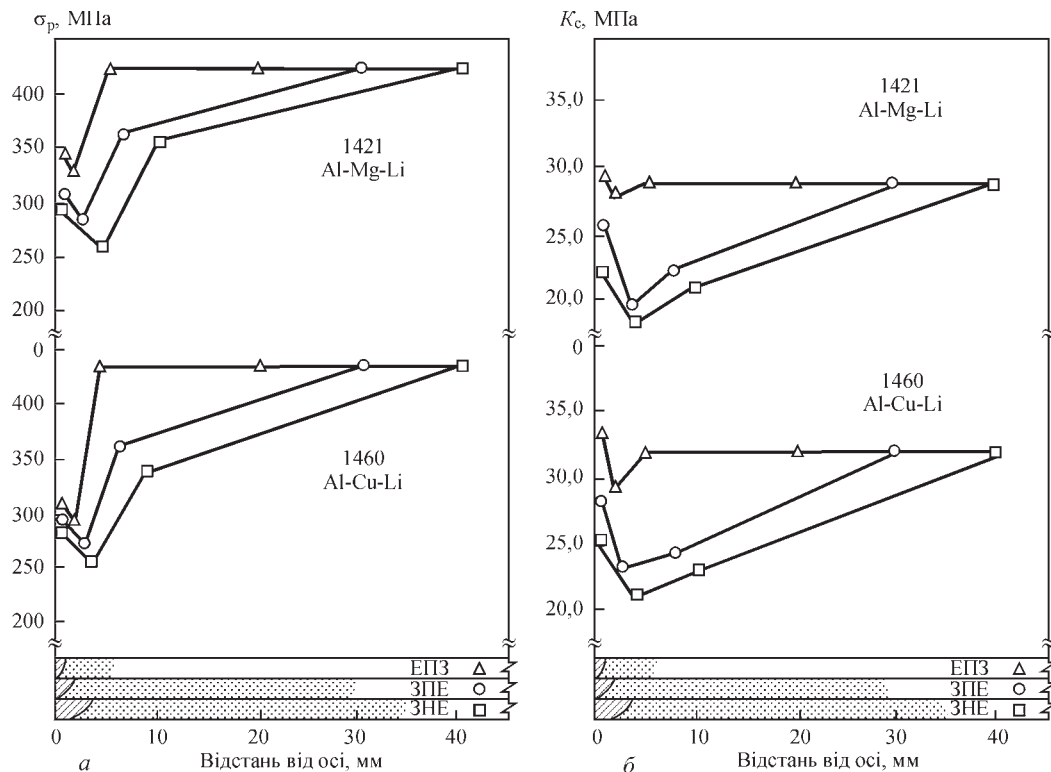


Рис. 13. Вплив способів зварювання електронним променем (ЕПЗ) плавким (ЗПЕ) та неплавким (ЗНЕ) електродами на міцність при руйнуванні  $\sigma_p$  (а) та тріщиностійкість  $K_c$  (б) різних зон з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів 1421 та 1460

формування і високочастотної механічної проковки швів забезпечує вищі показники довговічності від втомленості таких панелей порівняно з електронно-променевим та аргонодуговим зварюванням неплавким електродом із зануреною дугою. Застосування попереднього перед зварюванням пружного деформування листа і ребер жорсткості на рівні  $(0,3 \dots 0,4)\sigma_T$  забезпечує усунення зварювальних деформацій та створює необхідні умови для виконання зварювального процесу в автоматичному режимі. Визначено, що ефективним засобом неруйнівного контролю якості зварних швів цих панелей є електронна ширографія. На рис. 12 показано результат такого контролю у розтягнутому стані безпосередньо після зварювання панелі. На загальному фоні деформування досліджуваної ділянки спостерігається локальне викривлення, що свідчить про дефектну зону. Це підтверджує також тривимірна картина деформованої поверхні. Рентгеноконтроль підтвердив наявність скупчення пор в аномальній зоні. Розроблені технології бездеформаційного зварювання і неруйнівного контролю рекомендовані для промислового виробництва авіаційних панелей.

Однією з основних вимог до конструкційних матеріалів для аерокосмічної техніки є питома міцність. Цій вимозі відповідають алюмінієво-літєві сплави різних систем легування, які мають низьку щільність та підвищену питому міцність. Але невивченість зварюваності стримувало застосування цих сплавів у зварних

конструкціях. В ІЕЗ було виконано комплекс досліджень щодо зварюваності алюмінієво-літєвих сплавів. В результаті запропоновано ефективні методи зварювання та присадний матеріал, модифікований скандієм. Досліджено вплив способів зварювання на міцність та тріщиностійкість різних зон з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів (рис. 13).

Для вирішення задач геометричної та технологічної адаптації при роботизованому зварюванні відповідальних конструкцій в Інституті розроблено спеціалізовані системи технічного зору



Рис. 14. Зварювальний робот з системою технічного зору [7]



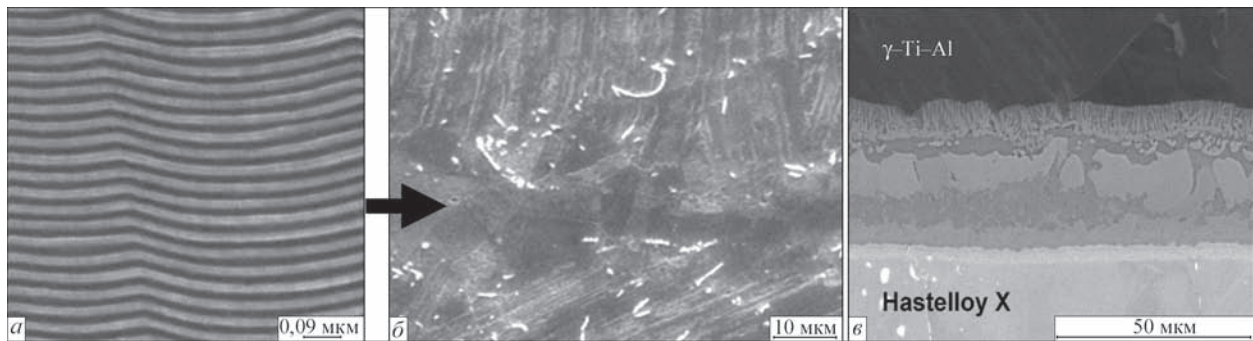


Рис. 15. Структури наночислової фольги та зварних з'єднань, отриманих із застосуванням наноструктурованих матеріалів: *a* — мікроструктура перетину наночислової фольги з шарів титану (темні) і алюмінію (світлі); *б* — мікроструктура зони з'єднання сплава на основі  $\gamma$ -Ti-Al; *в* — мікроструктура зони з'єднання сплава на основі  $\gamma$ -Ti-Al та жаростійкого на основі Ni

(рис. 14). Зварювальні роботи з системами технічного зору автоматично знаходять стик, у масштабі реального часу корегують траєкторію і параметри режиму зварювання для компенсації похибок складання та установки заготовок. Таким чином, виконують зварювальні операції цілком в автоматичному режимі. Системи технічного зору, розроблені в Інституті, з успіхом застосовуються з роботами таких відомих виробників, як ABB, FANUC, KUKA.

Композитні матеріали і інтерметаліди завдяки своїм унікальним властивостям все більше затребувані у багатьох галузях промисловості, будівництві, медицині та ін. Та їх використання стримується браком надійних технологій створення нерознімних з'єднань конструкцій з різномірних або нових наноструктурованих матеріалів. Застосування традиційних методів зварювання та паяння не забезпечує на практиці характеристик міцності.

Для вирішення цієї проблеми в Інституті розроблено парофазні технології отримання наноструктурованих матеріалів (НМ) з великою протяжністю границь зерен, близьких за хімічним складом до зварюваних матеріалів [8, 9]. На рис. 15 представлено структури деяких отриманих наноматеріалів на основі однофазних та гетерофазних систем. Наноструктуровані матеріали мають високу пластичність при нагріванні і низьку енергію активації дифузійної рухомості сплавів. Застосування таких НМ у якості проміжних прошарків у вигляді фольги (рис. 15, *a*) вирішує проблему зварювання сплавів на основі інтерметалідів та композитів [10, 11]. Також представлено структури з'єднань сплавів на основі інтерметалідів  $\gamma$ -Ti-Al (рис. 15, *б*) та жароміцного сплаву на основі нікелю (рис. 15, *в*). Висока реакційна здібність нанопрошаркових фольг та їх надпластичність при нагріванні в умовах зовнішнього навантаження дає можливість реалізувати процеси реакційного паяння за короткий проміжок часу розігріву зони з'єднання при низькому тиску. Ця технологічна схема може бути використана для ремонт-

них робіт в умовах локального розігріву зони з'єднання при обмеженому доступі до джерел енергії і можливості використання інтенсивних пучків випромінювання, наприклад, в умовах космосу.

Сьогодні у виробництві металевих конструкцій застосовується чимало новітніх матеріалів, але сталь — це основний конструкційний матеріал. В Інституті виконано комплекс досліджень для визначення оптимальних параметрів зварювання високоміцних сталей 10Г2ФБ з мікролегуванням ванадієм і ніобієм, а також сталей 12ГН2МФАЮ, 12ГН3МФАЮДР [12, 13]. Визначено, що ймовірність утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях високоміцних сталей може бути зведена до мінімуму, якщо використовувати технологію зварювання, що забезпечує охолодження з'єднань зі швидкістю  $w_{6/5}$  не більше  $10^\circ\text{C}/\text{с}$ , вміст дифузійного водню в наплавленому металі не більше  $4\text{ см}^3/100\text{ г}$  та рівень залишкових напружень в з'єднаннях із сталей менше 0,5 межі текучості. Завдяки цим дослідженням розроблено надійні та ефективні технології зварювання високоміцних низьковуглецевих легованих сталей з межею текучості 1000 МПа і вище, які були використані при виготовленні металевих конструкцій покриття НСК «Олімпійський» у м. Києві, сучасних резервуарів великої ємності для зберігання нафти та інших об'єктів.

Надійність — одна з найважливіших якостей, що відрізняє сучасні зварні конструкції. На її забезпечення спрямовано багато технологій, що розробляє Інститут електрозварювання. До їх числа слід віднести технологічні процеси електродинамічного оброблення (ЕДО) і високочастотного механічного проковування (ВМП). Новий технологічний процес, що застосовують після отримання зварних з'єднань — електродинамічна обробка імпульсами електричного струму високої щільності, сприяє підвищенню в'язкості та подрібненню структури металу, дозволяє суттєво зменшити залишкові напруження (рис. 16, *a*) та збільшити опір втомі (рис. 16, *б*) зварних з'єднань. Створене обладнання дозволяє усунути залишкові зварювальні

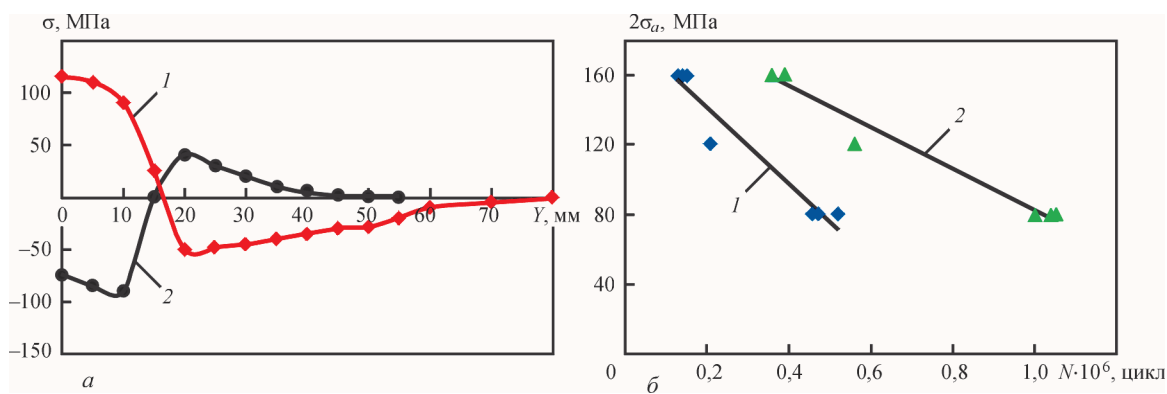


Рис. 16. Вплив ЕДО на залишкові напруження та довговічність зварних з'єднань сплава АМг6, виготовлених зварюванням ТІГ: а — залишкові напруження до обробки (1) та після (2); б — результати втомних випробувань зварних зразків без обробки (1) та з обробкою (2)



Рис. 17. Ручний інструмент та мобільне джерело живлення для ЕДО

деформації жолоблення тонкостінних елементів конструкцій (рис. 17). Розроблені технологія та апаратура забезпечили обробку відповідальних зварних з'єднань суднокорпусних та авіаційних

конструкцій, що сприяло збільшенню їх експлуатаційної надійності та довговічності [14, 15].

Проведені в Інституті дослідження довели, що ефективне зниження інтенсивності корозійно-втомного руйнування зварних з'єднань сталевих металоконструкцій забезпечує застосування технології височастотного механічного проковування [16–18]. Вплив промислової атмосфери помірного клімату моделювали витримкою зразків таврових та стикових зварних з'єднань розміром 350×70×12 мм із сталі 15ХСНД у камері вологості протягом 1200 год при температурі 40 °С і вологості повітря 98 %. Втомні випробування зразків проводили при віддільовому змінному розтягуванні з частотою 5 Гц. Відповідні криві втоми досліджуваних з'єднань приведені на рис. 18. Результати досліджень свідчать, що границі обмеженої витривалості на базі 2 млн циклів таврових і стикових зварних з'єднань підвищуються на 47 та 39 % відповідно; циклічна довговічність зварних з'єднань збіль-

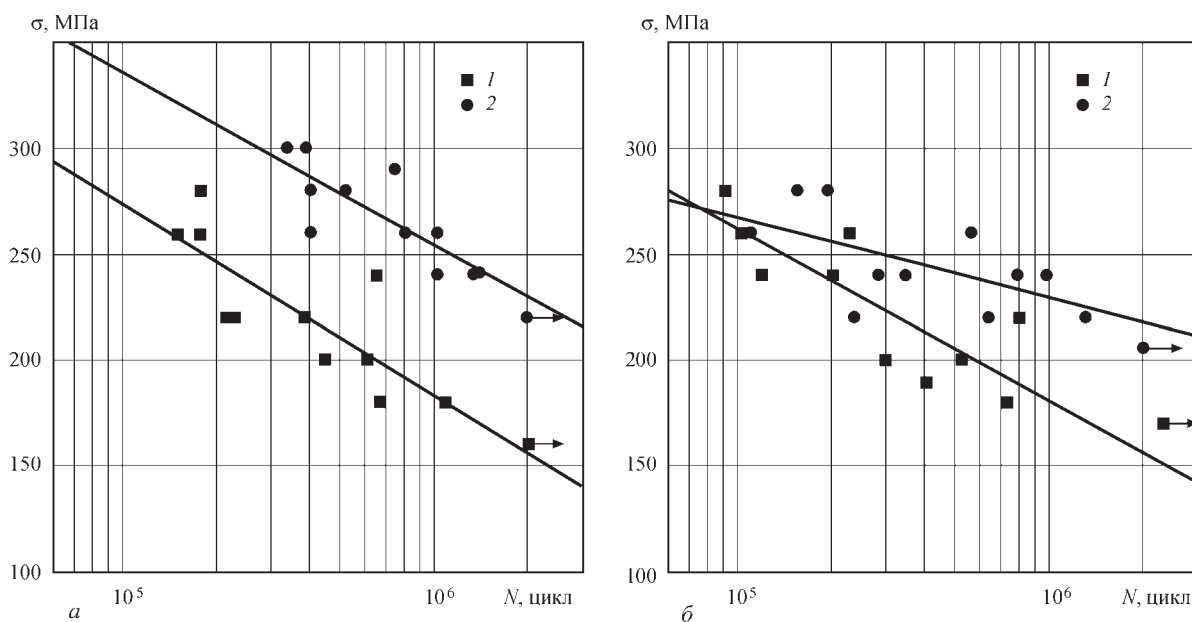


Рис. 18. Криві втоми таврових (а) та стикових (б) зварних з'єднань сталі 15ХСНД при впливі промислової атмосфери помірного клімату на протязі 1200 год: 1 — у вихідному стані; 2 — після обробки за технологією ВМП



Рис. 19. Центробіжне колесо компресора газотурбінного двигуна, яке виготовлено із застосуванням нового припою

шується до 7 разів в залежності від рівнів прикладених навантажень.

Створення надійних та продуктивних технологій і обладнання для підвищення зносостійкості деталей традиційно займає значне місце у тематиці досліджень Інституту. Вони затребувані у галузях металургійної, енергетичної промисловості, сільськогосподарському машинобудуванні та ін. Виконані комплексні дослідження основних закономірностей впливу технологічних параметрів дугового наплавлення на особливості формування структури та зміну фізико-механічних властивостей наплавлень по шару в залежності від вмісту вуглецю в колісних сталях, що коливається в діапазоні від 0,55 до 0,75 %, сприяли розробці нової технології дугового наплавлення для відновлення колісних пар вантажних вагонів [19], що містить спосіб та режими наплавлення, вимоги до підготовки коліс, хімічного складу наплавних матеріалів, попереднього підігріву, температура якого залежить від вмісту вуглецю в колісній сталі. Важливою особливістю цієї технології є уповільнене охолодження після наплавлення зі швидкістю  $\leq 35 \dots 40$  °C/год протягом 4...5 год. Застосування нової технології дозволило збільшити ударну в'язкість металу зони термічного впливу, опір напавленого металу крихкому руйнуванню до 2...3 разів. Ресурс безпечної експлуатації залізничних коліс збільшився в два рази.

Роботи Інституту електрозварювання в області паяння, що були запроваджені на початку 1960-х років, внесли значний вклад у цей напрямок. Розроблені наукові основи вакуумного паяння тонкостінних конструкцій з нержавіючих сталей різних класів були використані для одержання виробів відповідального призначення — стільникових панелей, антен тощо. У теперішній час вивчення фізико-металургійних процесів, які відбуваються під час високотемпературного вакуумного паяння жароміцних дисперсійно-твердіючих нікелевих сплавів, закономірностей структуроутворення паяних з'єднань дозволило створити припій системи Ni-Pd-Cr-1Ge. В якості депресанта було застосовано германій, який забезпечує структуру твердого розчину на основі паладію у



Рис. 20. Портативне цифрове рентгенотелевізійне обладнання, що розміщено на об'єкті

паяних швах. Паяні з'єднання мають стабільну статичну міцність 1230...1290 МПа при кімнатній температурі та 1000...1030 МПа при температурі 550 °C, що більше майже у два рази у порівнянні з промисловим припоєм. Із застосуванням створеного припою виготовляються відцентрові колеса осьового компресора газотурбінного двигуна з дисперсійно-твердіючого нікелевого сплаву (рис. 19) та інші вироби.

Успішний розвиток зварювальних технологій та створення довговічних надійних конструкцій відповідального призначення неможливо без застосування дефектоскопії та сучасних методів неруйнівного контролю якості зварних з'єднань.

Значним досягненням останніх років є створення портативного цифрового рентгенотелевізійного обладнання (рис. 20) на основі високочутливих твердотільних перетворювачів. Портативність, цифрове оброблення зображень, низька вартість відкривають нові можливості для виконання радіаційного контролю в польових та цехових умовах різних об'єктів, які на сьогодні не забезпечені можливостями неруйнівного контролю. Застосування портативного рентгенотелевізійного комплексу допомагає вирішенню проблеми контролю численних газо-, нафто- і гідророзподільчих трубопроводів малого діаметру, технологічних трубопроводів нафтохімічного виробництва.

Автоматизація та роботизація процесів неруйнівного контролю дає можливість суттєво підвищити достовірність прийняття рішень про дефектність виробів та виключити вплив людського фактору. Для неруйнівного контролю виробів складної геометрії створено комплекс, до якого входить промисловий робот з системою технічного зору (рис. 21). Ідентифікацію геометрії об'єкта контролю (ОК), сканування його поверхні вихровими датчиками комплекс «Каскад» виконує без участі людини. Він дозволяє: визначити положення ОК за допомогою системи технічного зору; автоматично підтримувати фіксований проміжок





Рис. 21. Робот з системою технічного зору для неруйнівного контролю виробів складної геометрії [20]

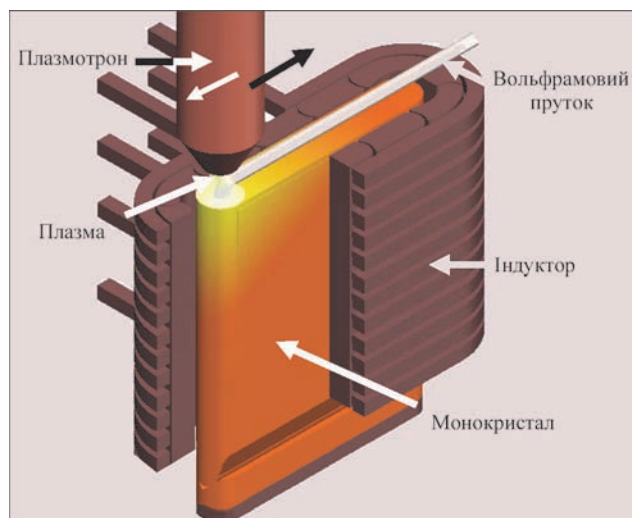


Рис. 22. Схема устаткування для вирощування монокристалів тугоплавких металів



Рис. 23. Монокристали вольфраму

між датчиками та ОК; стабілізувати швидкість переміщення вихретокового перетворювача на поверхні ОК; формувати паспорт дефектності виробів із зазначенням просторових координат дефектів; забезпечити високу продуктивність контролю.



Рис. 24. Апарат для зварювання живих тканин ЕКВЗ-300 «Патонмед»

В Інституті успішно продовжує розвиватися металургійний напрямок — спецелектрометалургія, яка забезпечує створення високоякісних сталей. Але її можливості цим не вичерпуються. Як виявилось, засобами спецелектрометалургії можливо вирощувати монокристали великих розмірів, що зробити за традиційною технологією неможливо. Успішно реалізується на практиці розроблений в Інституті принципово новий спосіб вирощування монокристалів тугоплавких металів, в якому одночасно використовується два різних джерела електричного нагрівання — плазово-дуговий та індукційний (рис. 22) [21]. Плазово-дуговий здійснює переплавлення витратного матеріалу (прутка) і формує тіло монокристала заданої конфігурації, індукційний — утримує локальну металеву ванну від проливів і створює необхідне температурне поле у кристалі, кристал росте при високій температурі підігріву  $(0,5 \dots 0,6) T_{пл}$  [22]. В результаті знижується напруження і щільність дислокацій (менше ніж  $10^6 \text{ см}^{-2}$ ) в зростаючому кристалі, що сприяє створенню більш довершеної монокристалічної структури. Підігрів монокристала до вищезазначеної температури — один із ключових елементів цієї технології. Створено унікальне устаткування для виробництва великих монокристалів вольфраму і молібдену у вигляді пластин розміром  $20 \times 170 \times 160$  мм (рис. 23). Ця технологія відноситься до адитивних технологій високого рівня [23].

Зварювання, залишаючись одним з основних технологічних процесів в різних галузях промисловості, поширилось в зовсім нову для себе сферу — медицину. І зараз ми можемо констатувати, що здійснилася мрія хірургів про швидке та безкровне роз'єднання та з'єднання живої тканини без застосування шовного матеріалу.

Інститут у творчому співробітництві з провідними медичними закладами України створив технологію та обладнання (рис. 24) для високочастотного зварювання м'яких живих тканин [24–28]. На даний час розроблено і застосовується біля 200 різних хірургічних методик, за якими щорічно виконується 35...40 тис. операцій в таких областях,



Рис. 25. Багатофункціональний термохірургічний апарат ЕК-300 МШ «Патонмед» та хірургічний інструментарій

як абдомінальна і торакальна хірургія, травматологія, пульмонологія, проктологія, урологія, мамологія, офтальмологія, нейрохірургія та інші. Створена та продовжує удосконалюватись апаратура та інструментарій для високочастотного зварювання живих тканин. Слід зазначити, що багато країн світу зацікавлені цією технологією.

Але на цьому ми не зупиняємось. В Інституті створено новий процес безконтактної конвекційно-інфрачервоної обробки живих тканин. Він пройшов всебічну перевірку і довів свою ефективність. З його використанням здійснюється як перша допомога, так і спеціалізована хірургічна. Він дає можливість зупинити кровотечі з паренхіматозних органів, губчатих кісток і судин невеликого діаметру, санувати інфіковані та хронічні гнійні рани при травмах, коагулювати тканини для проведення безкровного розсічення, здійснювати термоабляцію пухлин і метастазів. Кожна з розглянутих технологій має свої переваги і свої застосування. Об'єднання їх у одному апараті дозволяє збільшити можливості хірургів (рис. 25).

Далеко неповний огляд наших робіт свідчить, що на основі проблемно-орієнтованих фундаментальних досліджень в Інституті електрозварювання успішно створюються нові наукові технології та обладнання. Ми й надалі будемо активно працювати над такими дослідженнями та розробками, які матимуть перспективу та будуть затребувані на світовому ринку зварювальної техніки.

### Список літератури

1. Korzhik V. N., Pashchin N. A., Mikhoduj O. L. et al. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma-arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, **4**, 30-34.
2. Korzhik V. N., Sydorets V. N., Shanguo Han, Babich A. A. (2017) Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding of thin-walled structures. *Ibid*, **5**, 62-70.
3. Hamm R.W. (2008) Reviews of accelerator science and technology. *Industrial Accelerators*, **1**, 163-184.
4. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Нестеренков В. М. и др. (2004) Компьютерное управление процессом электрон-

- но-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия. *Автоматическая сварка*, **5**, 3-7.
5. Maksimov S. (2017) E. O. Paton Electric Welding Institute activity in the field of underwater welding and cutting. *Підводні технології*, **6**, 37-45.
6. Патон Б. Е., Лебедев В. А., Максимов С. Ю., Пичак В. Г., Полосков С. И. (2011) Совершенствование оборудования для подводной механизированной и автоматизированной сварки и резки порошковой проволокой. *Сварка и Диагностика*, **5**, 54-59.
7. Шаповалов Е. В., Долиненко В. В., Коляда В. А. и др. (2016) Применение роботизированной и механизированной сварки в условиях возмущающих факторов. *Автоматическая сварка*, **7**, 46-51.
8. Ustinov A. I., Polishchuk S. S., Demchenkov S. A., Petrushinets L. V. (2015) Effect of microstructure of vacuum-deposited Fe100-xNi<sub>x</sub> (30<x<39) foils with FCC structure on their mechanical properties. *J. Alloys and Compounds*, **622**, 54-61.
9. Ustinov A. I. (2008) Dissipative properties of nanostructured materials. *Strength of Materials*, **40**, 571-576.
10. Ustinov A., Falchenko Yu., Ishchenko A. (2008) Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043-1045.
11. Ustinov A., Falchenko Yu., Melnichenko T. (2013) Diffusion welding of aluminum alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil. *J. of Materials Processing Technology*, **213**, **4**, 543-552.
12. Позняков В. Д., Довженко В. А., Жданов С. Л. и др. (2010) Структурные превращения при сварке стали 10Г2ФБ и свойства сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **11**, 12-16.
13. Позняков В. Д., Синеок А. Г., Жданов С. Л., Максименко А. А. (2011) Опыт применения стали S355J2 в металлоконструкциях перекрытия над НСК «Олимпийский». *Там же*, **6**, 54-55.
14. Lobanov L. M., Paschin N. A., Mihoduy O. L. (2014) Repair the AMr6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld Research and Application*, **1**, 55-62.
15. Лобанов Л. М., Пашин Н. А., Савицкий В. В., Миходуй О. Л. (2014) Исследование остаточных напряжений в сварных соединениях жаропрочного сплава МЛ10 с применением электродинамической обработки. *Проблемы прочности*, **6**, 33-41.
16. Knysh V. V., Solovei S. A., Kadyshev A. A., Nyrkova, L. I., Osadchuk, S. A. (2017) Influence of High-Frequency Peening on the Corrosion Fatigue of Welded Joints. *Materials Science*, **53**, 7-13.
17. Daavary M., Sadough Vanini S.A. (2015) Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. *Materials Letter*, **139**, 462-466.
18. Fan Y., Zhao X., Liu Y. (2016) Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*, **94**, 515-522.
19. Позняков В. Д., Гайворонський О. А., Клапатюк А. В. (2014) Спосіб відновлення виробів з високовуглецевих сталей. Україна, Пат. 107301.
20. Долиненко В. В., Шаповалов Є. В., Скуба Т. Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумового контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, **5-6** (764), 60-67.
21. Патон Б. Е., Шаповалов В. А., Григоренко Г. М. и др. (2016) Плазменно-индукционное выращивание профилированных монокристаллов тугоплавких металлов. Киев, Наукова думка.
22. Шаповалов В. А., Якуша В. В., Никитенко Ю. А. (2014) Изучение температурного поля профилированных монокристаллов вольфрама, получаемых плазменно-индукционным способом. *Современная электрометаллургия*, **3**, 31-35.
23. Шаповалов В. А., Якуша В. В., Гниздыло А. Н., Никитенко Ю. А. (2016) Применение аддитивных технологий для выращивания крупных профилированных монокри-



сталлов вольфрама и молибдена. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 145-147.

24. *Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия* (2009) Патон Б. Е., Иванова О. Н. (редакторы). Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Международная Ассоциация «Сварка».
25. Патон Б. Е., Кривцун И. В., Маринский Г. С. и др. (2013) Высокочастотная сварка и термическая обработка живых тканей в хирургии. *Наука і практика*, **1**, 25-39.
26. Патон Б. Е., Маринский Г. С., Подпратов С. Е., Ткаченко В. А., Ткаченко С. В., Чвертко Н. А., Чернець О. В. (2012) *Электрокоагулятор высокочастотный зварювальний ЕКВЗ-300*. Україна, Пат. 72577U, МПК А 61 В 18/12.
27. Патон Б. Е., Кривцун И. В., Маринский Г. С., Матвійчук Г. М. (2013) Сварка, резка и термическая обработка живых тканей, *Автоматическая сварка*, **10-11**, 135-146.
28. Патон Б. Е., Ткаченко В. А., Маринский Г. С., Матвійчук Г. М. (2014) *Спосіб з'єднання біологічних тканин людей і тварин з використанням високочастотного струму*. Україна Пат. 106513.

## References

1. Korzhik, V.N., Pashchin, N.A., Mikhoduj, O.L. et al. (2017) Comparative evaluation of methods of arc and hybrid plasma-arc welding of aluminum alloy 1561 using consumable electrode. *The Paton Welding J.*, **4**, 30-34.
2. Korzhik, V.N., Sydorets, V.N., Shanguo Han, Babich, A.A. (2017) Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding of thin-walled structures. *Ibid*, **5**, 62-70.
3. Hamm, R.W. (2008) Reviews of accelerator science and technology. *Industrial Accelerators*, **1**, 163-184.
4. Paton, B.E., Nazarenko, O.K., Nesterenkov, V.M. et al. (2004) Computer control of electron beam welding with multicoordinate displacements of the gun and workpiece. *The Paton Welding J.*, **5**, 2-5.
5. Maksimov, S. (2017) E. O. Paton Electric Welding Institute activity in the field of underwater welding and cutting. *Pidvodni Tekhnologii*, **6**, 37-45.
6. Paton, B.E., Lebedev, V.A., Maksimov, S.Yu. et al. (2011) Improvement of equipment for underwater mechanized and automated welding and cutting with flux-cored wire. *Svarka i Diagnostika*, **5**, 54-59 [in Russian].
7. Shapovalov, E.V., Dolinenko, V.V., Kolyada, V.A. et al. (2016) Application of robotic and mechanized welding under disturbing factor conditions. *The Paton Welding J.*, **7**, 42-46.
8. Ustinov, A.I., Polishchuk, S.S., Demchenkov, S.A., Petrushinets, L.V. (2015) Effect of microstructure of vacuum-deposited Fe100-xNix (30<x<39) foils with FCC structure on their mechanical properties. *J. Alloys and Compounds*, **622**, 54-61.
9. Ustinov, A. I. (2008) Dissipative properties of nanostructured materials. *Strength of Materials*, **40**, 571-576.
10. Ustinov, A., Falchenko, Yu., Ishchenko, A. (2008) Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043-1045.
11. Ustinov, A., Falchenko, Yu., Melnichenko, T. (2013) Diffusion welding of aluminum alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles through an Al/Cu multilayer foil. *J. of Materials Processing Technology*, **213**, **4**, 543-552.
12. Zhdanov, S.L., Poznyakov, V.D., Maksimenko, A.A. et al. (2010) Structure and properties of arc-welded joints on steel 10G2FB. *The Paton Welding J.*, **11**, 8-12.
13. Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Sineok, A.G. et al. (2011) Experience of application of S355J2 steel in metal structures of the roofing over NSC «Olimpijsky» (Kiev). *Ibid.*, **6**, 45-46.
14. Lobanov, L.M., Paschin, N.A., Mihoduy, O.L. (2014) Repair the AMg6 aluminum alloy welded structure by the electric processing method. *Weld Research and Application*, **1**, 55-62.
15. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Savitsky, V.V., Mikhoduj, O.L. (2014) Investigation of residual stresses in welded joints of heat-resistant alloy ML10 using electrodynamic treatment. *Problemy Prochnosti*, **6**, 33-41 [in Russian].
16. Knysh, V.V., Solovei, S.A., Kadyshev, A.A., Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.A. (2017) Influence of high-frequency peening on the corrosion fatigue of welded joints. *Materials Sci.*, **53**, 7-13.
17. Daavary, M., Sadough Vanini, S.A. (2015) Corrosion fatigue enhancement of welded steel pipes by ultrasonic impact treatment. *Materials Letter*, **139**, 462-466.
18. Fan, Y., Zhao, X., Liu, Y. (2016) Research on fatigue behavior of the flash welded joint enhanced by ultrasonic peening treatment. *Materials & Design*, **94**, 515-522.
19. Gajvoronsky, O.A., Poznyakov, V.D., Klapatyuk, A.V. (2014) *Method of restoration of high-carbon steel products*. Pat. 107301, Ukraine [in Ukrainian].
20. Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 51-57.
21. Paton, B.E., Shapovalov, V.A., Grigorenko, G.M. et al. (2016) *Plasma-induction growing of profiled single crystals of refractory metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
22. Shapovalov, V.A., Yakusha, V.V., Nikitenko, Yu.A. et al. (2014) Studying the temperature field of profiled tungsten single-crystals produced by plasma-induction process. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 31-35 [in Russian].
23. Shapovalov, V.A., Yakusha, V.V., Gnizdylo, A.N., Nikitenko, Yu.A. (2016) Application of additive technologies for growing large profiled single crystals of tungsten and molybdenum. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 134-136.
24. (2009) *Tissue-saving high-frequency electric welding surgery*. Ed. by B.E. Paton, O.N. Ivanova. Kiev, PWI, IAW [in Russian].
25. Paton, B.E., Krivtsun, I.V., Marinsky, G.S. et al. (2013) High-frequency welding and thermal treatment of live tissues in surgery. *Nauka i Praktyka*, **1**, 25-39 [in Russian].
26. Paton, B.E., Marinsky, G.S., Podpryatov, S.E. et al. (2012) *Welding high-frequency electrocoagulator ЕКВЗ-300*. Pat. 72577U, Ukraine, Int. Cl. A61 B 18/12 [in Ukrainian].
27. Paton, B.E., Krivtsun, I.V., Marinsky, G.S. et al. (2013) Welding, cutting and heat treatment of live tissues. *The Paton Welding J.*, **10-11**, 142-153.
28. Paton, B.E., Tkachenko, V.A., Marinsky, G.S., Matviichuk, G.M. (2014) *Method of joining human and animal biological tissues using high-frequency current*. Pat. 106513, Ukraine [in Ukrainian].

## СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Б. Е. ПАТОН

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

Представлен ряд новых разработок Института электросварки, созданных в последнее время, а именно, технологии и оборудование для сварки с применением высококонцентрированных источников энергии — плазмы, лазера, электронного луча. Созданы технологии для сварки труб, титана больших толщин, алюминий-литиевых сплавов, высокопрочных сталей. Разработаны парофазные технологии получения наноструктурированных материалов для сварки композитных материалов и интерметаллидов. Созданы технологии и оборудование для сварки и резки под водой, новый



электронно-лучевой инструмент для сварочных работ в открытом космосе. Для повышения долговечности и надежности сварного шва предложена послесварочная обработка — импульсами электрического тока высокой плотности и высокочастотная механическая проковка. Для контроля качества сварных конструкций создано цифровое оборудование на основе высокочувствительных твердотельных преобразователей, а для изделий сложной геометрии — промышленный робот с системой технического зрения. Разработан новый способ выращивания монокристаллов тугоплавких металлов. Представлена новая аппаратура для сварки живых тканей. Библиогр. 28, табл. 2, рис. 25.

*Ключевые слова:* сварка плазменная, лазерная, электронно-лучевая, контактная, титан, алюминий-литиевые сплавы, прочность, контроль качества, наплавка, монокристаллы, сварка живых тканей

## ADVANCED STUDIES AND DEVELOPMENTS OF THE E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE IN THE FIELD OF WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES

**B.E. PATON**

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

A number of recent new developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute is presented, namely the technologies and equipment for welding with applying the highly-concentrated power sources: plasma, laser and electron ones. Technologies were developed for welding of pipes, thick titanium, aluminium – lithium alloys, high-strength steels. The vapor-phase technologies were developed for producing nanostructured materials for welding composite materials and intermetallics. Technologies and equipment for underwater welding and cutting, new electron beam tool for welding in open space were developed. To increase the life and safety of the weld, the postweld treatment was suggested by using the high-density electric pulses and high-frequency mechanical peening. To control the quality of welded joints, the designed digital equipment, based on high-sensitive solid-body converters and an industrial robot with a technical vision system for products of intricate geometry were developed. The new method was developed for growing refractory metal single crystals. New equipment is presented for welding of live tissues. 28 Ref., 2 Tabl., Fig. 25.

*Keywords:* plasma, laser, electron beam and resistance welding, titanium, aluminium-lithium alloys, quality control, surfacing, single crystals, welding of live tissues

Надійшла до редакції 30.10.2018

### Технологии ИЭС доступны...

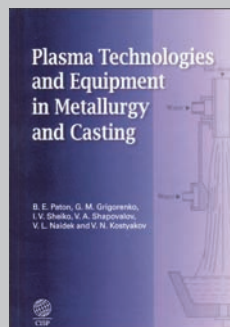
**Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве /**  
Б. Е. Патон, Г. М. Григоренко, И. В. Шейко и др. Киев: Наук. думка, 2013. – 488 с.



В монографии приведены научные и прикладные аспекты применения плазменных источников нагрева (плазмотронов) в металлургическом и литейном производстве. Рассмотрены основные типы плазмотронов, используемые для плавки металлов и обработки металлических расплавов в лабораторных и промышленных условиях.

Показано промышленное применение плазменных источников нагрева, на базе которых разработаны новые металлургические процессы и технологии. Описаны конструкции плавильных печей на керамическом поду и переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, установок для рафинирующего переплава поверхностного слоя слитков, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и др. Приведены результаты сравнения качества металлов и сплавов, выплавленных с применением различных технологий.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических предприятий и литейного производства, а также для преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующих специальностей.



Книга переиздана в Великобритании на английском языке в 2015 г. и в Китае на китайском в 2018 г.

# ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ, РАСХОДУЕМОЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ, НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

Учитывая, что применение акустической эмиссии при непрерывном мониторинге эксплуатирующихся конструкций позволяет эффективно решать целый ряд вопросов обеспечения и управления их безопасностью, а использование интернета обеспечивает контроль этого процесса практически из любой внешней точки, все большую актуальность приобретает применение методов оценки состояния материалов на основе данных акустической эмиссии. Данные, полученные как при мониторинге реальных конструкций, так и при испытаниях образцов, показывают, что для оценки состояния материалов конструкций может представлять интерес энергия, связанная с деформированием материала и образованием в нем повреждений. Выделение из общей энергии разрушения части, связанной с образованием повреждений, может существенно уточнить расчеты на прочность и оценить состояние материала в каждый момент времени его эксплуатации под нагрузкой. В настоящей работе приведены возможности использования данных акустической эмиссии по выделению этой части энергии и показано, какую часть общей энергии разрушения она составляет и ее связь с накоплением повреждений структуры материала, которые в процессе повреждаемости суммируются и, в конечном счете, приводят к разрушению. Библиогр. 15, рис. 5.

*Ключевые слова:* прочность материалов, энергия разрушения материалов, диагностика

В последнее время при испытании материалов, оценки их несущей способности все большие надежды возлагают на акустическую эмиссию (АЭ), как на средство достаточно надежной оценки состояния конструкций как при испытаниях, так и при эксплуатации [1–15]. Ранее проведенные исследования показали целесообразность такого подхода [1–3, 10, 13]. Так, применение АЭ при непрерывном мониторинге эксплуатирующихся конструкций позволило решить целый ряд вопросов, связанных с обеспечением и управлением их безопасностью [4, 6–8, 10, 14]. Использование интернета в контролирующей аппаратуре позволило управлять контролем практически из любой внешней точки [7]. Для оценки состояния материалов конструкций существенный интерес представляет энергия, связанная с деформированием материала и образованием в нем повреждений. Вопрос о том, какую часть общей энергии разрушения составляет энергия, связанная с образованием повреждений, является важной частью расчетов на прочность, позволяющих оценить состояние материала в каждый момент времени его эксплуатации под нагрузкой. Ниже приведены возможности использования данных АЭ по выделению этой части энергии и показано, какую часть общей энергии разрушения она составляет и ее связь с накоплением повреждений структуры материала, которые в процессе повреждаемости суммируются и, в конечном счете, приводят к разрушению.

Отметим, что полная работа (энергия), затраченная на разрушение, например, образцов, описывается интегралами по направлению действия силы, производящей работу, и может быть представлена известной формулой:

$$A_o = V_m \int_0^{t_p} P t dt, \quad (1)$$

где  $A_o$  – полная работа (энергия) затраченная на разрушение образца, Дж;  $P$  – действующая нагрузка, кг;  $V_m$  – скорость перемещения захватов разрывной машины, м/с;  $t$  – время, с;  $t_p$  – время до разрушения образца, с.

Часть этой энергии составляют величины, относящиеся к энергии, возникающей в местах образования повреждений. Если амплитуда АЭ событий измеряется в дБ, то энергия будет:

$$\mathcal{E}_A = P A_c K = U_o P 10^{\frac{A_{дБ}}{20} - 5} K, \text{ Дж}; K = \frac{1}{K_1} = F(f), \text{ м/мВ}$$

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_i A_{c,i} K = U_o \sum_{i=1}^N P_i 10^{\frac{A_{дБ,i}}{20} - 5} K, \text{ Дж}; \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{K_1} = F(f), \text{ м/мВ},$$

где  $U_o$  – опорный параметр амплитуды,  $U_o = 1 \cdot 10^{-9}$ , В;  $P_i$  – текущая нагрузка, кг;  $A_c, A_{c,i}$  – мгновенное и текущее значения амплитуды события АЭ, дБ;  $A_{дБ}, A_{дБ,i}$  – мгновенное и текущее значения амплитуды события АЭ, дБ;  $K$  – коэффициент перехода от мВ к перемещениям в м (рис. 1);  $\mathcal{E}_A$  – энергия единичного события АЭ, Дж;  $\mathcal{E}_{\Sigma}$  – суммарная

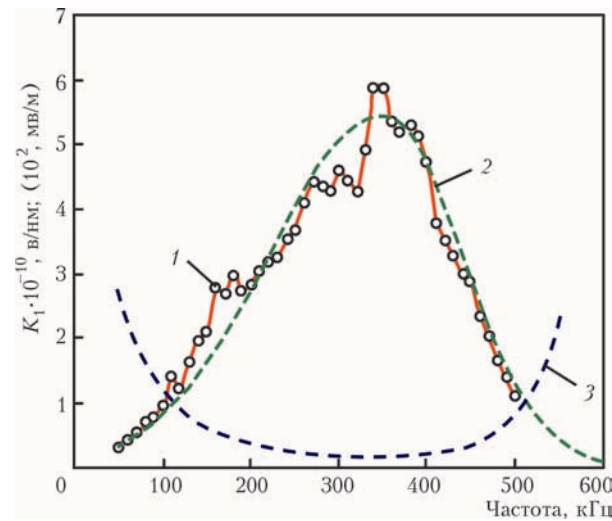


Рис. 1. Принятый в расчетах коэффициент электроакустического преобразования  $K_1$  АЭ датчика с чувствительным элементом ЦТС-19. Представлена экспериментальная кривая 1 на основе работы [4] и аналитическое приближение (пунктирная линия) 2 – прил.  $K_1$ , 3 – прил.  $1/K_1$

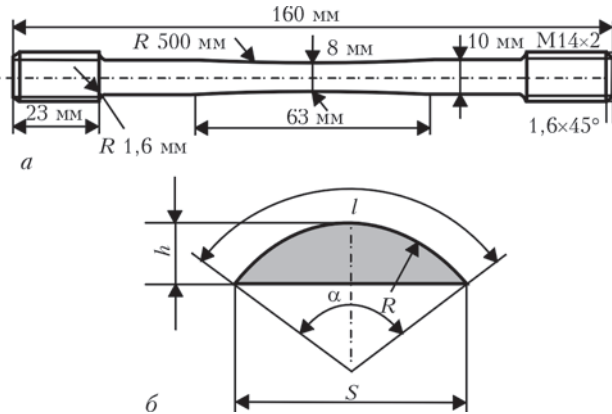


Рис. 2. Чертеж образца, принятого для испытаний (а) и схема к расчету его объема (б)

энергия повреждений, образовавшихся в процессе разрушения, Дж;  $A_o$  – общая энергия разрушения образца, Дж:

$$A_o = V_m \int_0^{t_p} P dt,$$

где  $V_m$  – скорость перемещения захватов разрывной машины,  $V_m = 0,0001$  м/с.

Объем испытанного образца (рис. 2) сложной формы с выточкой, образованной окружностью радиусом  $R$ , составляет [4]:

$$V = F \int_0^{2\pi} r d\beta = 2\pi r F = \pi r S h, \tag{3}$$

где  $F \approx 0,5Sh$  – площадь выточки;  $\beta$  – угловая координата в окружности, образующей цилиндрическую поверхность образца.

Удельная энергия разрушения с учетом приведенных расчетов составляет:

$$\mathcal{E}_{уд} = A_o / V \text{ и } \mathcal{E}_{A,уд} = \mathcal{E}_{A\Sigma} / V.$$

Рассмотрим этот процесс на примере разрушения образца из стали X18H9 (рис. 2). Типичная картина развития разрушения и распределения во времени основных параметров АЭ при растяжении этого образца представлена на рис. 3. Испытания проводили на жесткой разрывной машине, для регистрации АЭ использовали прибор ЕМА-3 с программным обеспечением ЕМА-3.9. Значения используемых параметров АЭ представлены в таблице справа.  $S(X)$  – погрешность определения координаты  $X$ , мм. Количественные значения нагрузки  $P$  и АЭ параметров определяются путем умножения их максимальных величин, указанных в скобках таблицы с правой стороны графика

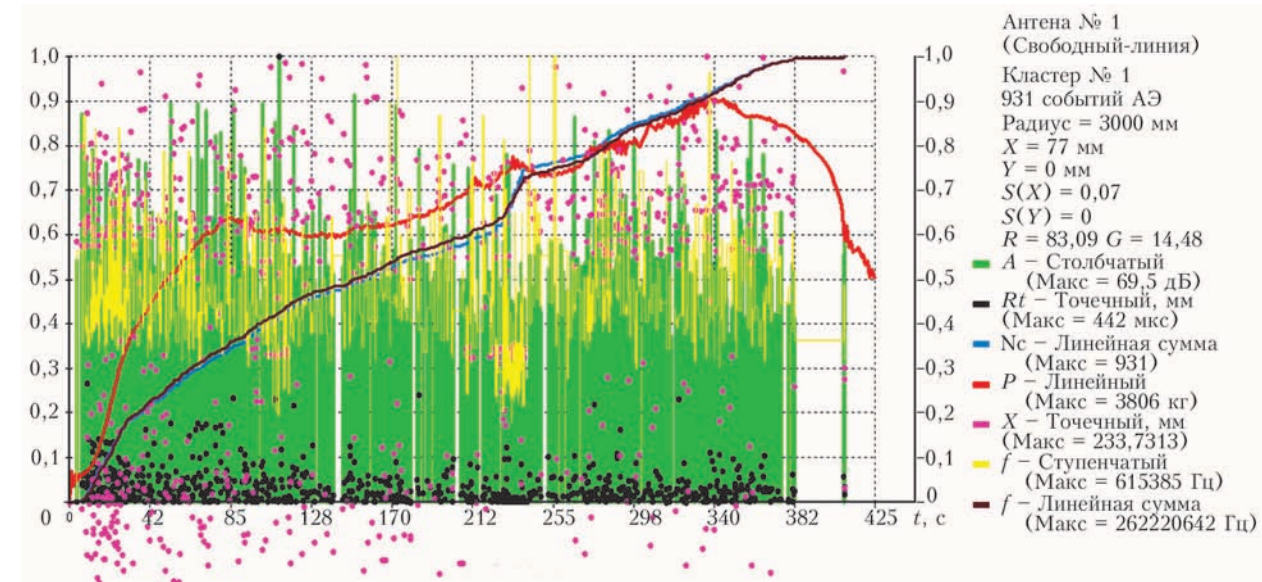


Рис. 3. Распределение во времени параметров АЭ событий, возникших при испытании вплоть до разрушения образца (рис. 2). Представлены АЭ события, участвующие в формировании энергии образующихся повреждений структуры материала образца, в том числе и те, вычисленные координаты которых выходят за его границы в связи с погрешностями в измерении временных задержек (точки розового цвета в нижней части графика)



ка, на значение относительной величины на оси ординат.

Представленные на рис. 3 параметры АЭ означают [5]:

$A$  – амплитуда сигналов в событии АЭ, дБ;  $Rt$  – райс тайм (время нарастания сигнала до максимума в событии АЭ), мкс;  $Nc$  – общая сумма событий в рассматриваемый момент времени, характеризует число дефектов, возникших к данному моменту времени;  $P$  – разрушающая нагрузка, кг;  $X$  – координата каждого из событий, возникших в процессе испытания образца, мм;  $f$  – частота сигналов АЭ, возникающих при образовании событий, Гц.

Во избежание потери в расчетах энергии АЭ событий, координаты которых, определенные при обработке данных, вышли за пределы контролируемой области в результате погрешностей определения временных задержек, пределы области измерений были расширены в обе стороны граничных размеров образца на величину  $\pm 50$  мм, и, кроме этого, увеличена максимально допустимая задержка по времени. Образовавшаяся после такой коррекции картина представлена розовыми точками, вышедшими снизу за пределы графика на рис. 3 – координатами  $X$  событий АЭ, в силу погрешности якобы пришедших извне образца, но физически относящихся к реально происходящим в нем процессам.

В результате испытаний было зафиксировано 931 событие АЭ за время 425 с.<sup>1</sup>

График на рис. 3 наглядно представляет всю картину АЭ испытаний образца. Виден существенный разброс координат АЭ, показывающий, что события АЭ, а значит и повреждения в материале, возникают по всей его протяженности. При этом каждое событие характеризуется вполне определенной амплитудой, временем нарастания сигнала и его частотой. График также показывает (желтая кривая), что датчики работают практически во всем диапазоне своих возможностей по частоте – от 74,666 до 615,385 кГц. Таким образом, с применением аппаратуры ЕМА-3.9 получена вся необходимая информация для непрерывного анализа и расчета энергии, затраченной на образование повреждений.

Расчет энергии АЭ событий по формулам (2) предусматривает перевод значений амплитуд из размерности в дБ в вольты (В). Далее используется коэффициент  $K$  для перехода к перемещениям в каждой конкретной точке возникновения событий АЭ. Следует отметить, что значения коэффициента  $K_1$  получены Хабаровским филиалом института ВНИИФТРИ Госстандарта СССР

специально для датчиков АЭ типа ДАЭ 002Р, разработанных для аппаратуры серии ЕМА. В нашем случае величина коэффициента  $K = 1/K_1$  определялась с учетом применения для измерений более чувствительных АЭ датчиков<sup>2</sup>. При этом учитывались результаты тестирования, полученные ВНИИФТРИ. Принятые для расчетов данные по электроакустической связи представлены на графике рис. 1. Результаты расчетов приведены на рис. 4. Полная энергия, затраченная на образование повреждений, будет определяться как сумма

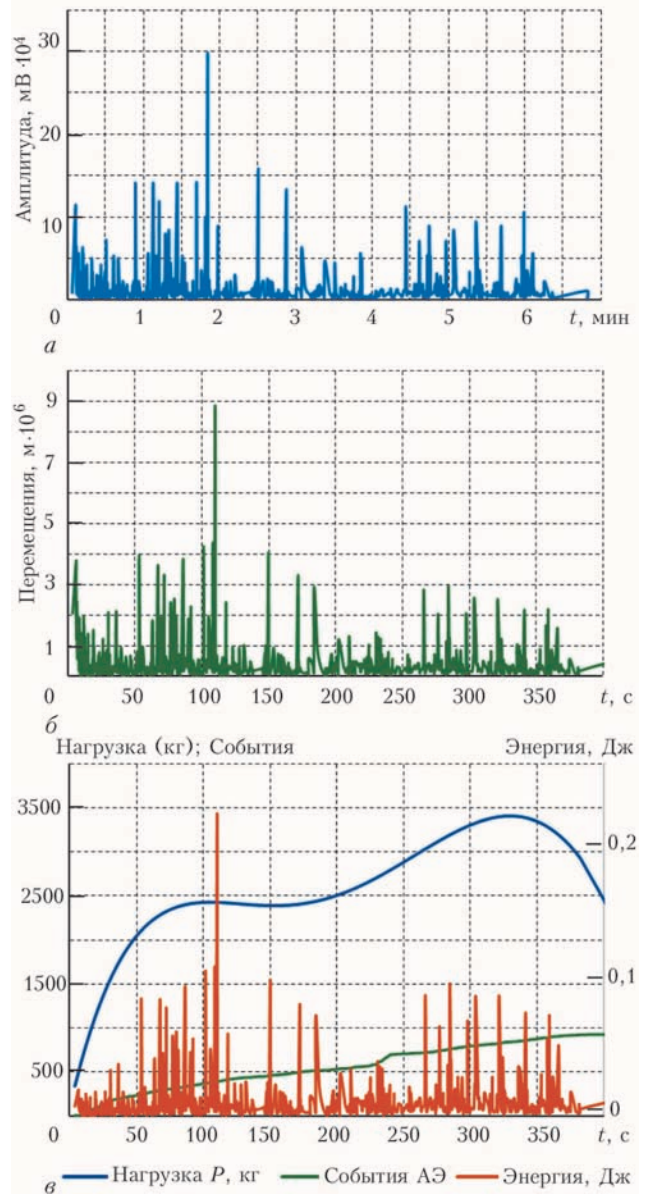


Рис. 4. Распределение амплитуд АЭ событий во времени для каждого события, (а); перемещения материала в местах возникшей АЭ, (б); нагрузка  $P$ , суммарное количество зарегистрированных событий АЭ и энергия, затраченная на образование повреждений в каждой конкретной точке возникновения события (в)

<sup>1</sup> При проведении испытаний аппаратура ЕМА-3.9 была настроена на фиксацию всех сигналов АЭ, образующих событие, в предположении, что все построенные события АЭ связаны с образованием повреждений.

<sup>2</sup> Датчики новой конструкции разработаны М.А. Яременко и Л.Ф. Харченко.

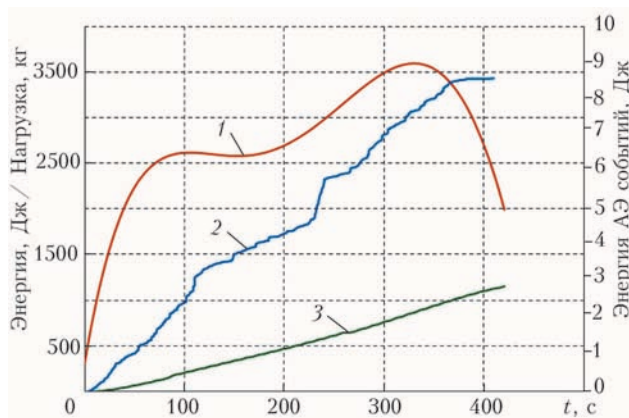


Рис. 5. Накопление с течением времени энергии в образце: 1 — нагрузка; 2 — энергия импульсов АЭ; 3 — общая энергия в образце при его разрушении.

отдельных составляющих. Суммирование энергии по всем событиям дает величину 8,6 Дж. Общая энергия, связанная с разрушением образца, подсчитывается по формуле (1).

$$A_o = V_m \int_0^{t_p} P dt = 1153 \text{ Дж.}$$

Таким образом, расчеты показывают, что энергия, затраченная на образование повреждений, составляет примерно 0,74% от общей энергии разрушения. Как видим, величина энергии, связанная с образованием повреждений в материалах при разрушении незначительна. Однако, учитывая, что эта величина достаточно точно и надежно фиксируется и распознается методом АЭ и, в частности, специализированной аппаратурой ЕМА-3.9, можно считать вполне допустимым ее использование при определении кинетики накопления повреждений и, связанного с ними, состояния материала. Накопление с течением времени энергии в образце при его разрушении, подсчитанное по формуле (1), вместе с ростом нагрузки и энергии от событий АЭ представлено на рис. 5.

Для определения общей удельной энергии разрушения образца и энергии, связанной с образованием повреждений, подсчитаем объем разрушаемого образца. Учитывая незначительный при принятых размерах образца объем, связанный с выточкой (примерно 6%) подсчитаем объем образца без ее учета:  $V \approx \pi d^2 / 4l$ . Здесь  $d$  — диаметр образца, см;  $l$  — его длина, см. Тогда  $V \approx 12,56 \text{ см}^3$ . Удельные энергии разрушения  $\mathcal{E}_{уд}$  и образования повреждений  $\mathcal{E}_{А,уд}$  будут составлять, соответственно:  $\mathcal{E}_{уд} \approx 92 \text{ Дж/см}^3$ ,  $\mathcal{E}_{А,уд} \approx 0,7 \text{ Дж/см}^3$ .

## Выводы

1. На основе данных, полученных методом АЭ, может быть рассчитана величина энергии, затрачиваемой на образование повреждений, возникающих в процессе разрушения материалов.

2. Величина энергии, затрачиваемой на образование повреждений рассчитывалась с использованием комплекса специализированных параметризованных АЭ, которые реализованы в программном обеспечении аппаратуры ЕМА-3.9. Чувствительности АЭ аппаратуры вполне достаточно для определения величины этой энергии. При этом, энергия может быть определена в процессе деформирования материала или на любом выделенном этапе.

3. Часть общей энергии, затрачиваемой на образование повреждений, незначительна и суммарно составляет для рассмотренного случая испытаний примерно 8,6 Дж.

4. Проведенные исследования показывают, что при достигнутой чувствительности контролирующей аппаратуры и наличии специального программного обеспечения можно достаточно надежно с использованием метода АЭ оценивать энергию, затрачиваемую на образование повреждений материалов при их разрушении. Последнее позволяет оценивать остаточный ресурс материала.

## Список литературы

1. Бриджмен Н. (1955) *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. Москва, Изд-во иностр. лит.
2. Волков В. А. (1980) *Основные результаты базового эксперимента по механике разрушения на низкопрочной стали*. Проблемы разрушения металлов. Москва, Знание.
3. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР, препринт.
4. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Патон Б. Е. (ред.) Киев, Индпром.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Алексеев Т. А. (2018) *Исследование методом акустической эмиссии кинетики накопления повреждений при разрушении материалов. Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 3–10.
6. Недосека С. А. (1992) Метод акустической эмиссии как эффективное средство для исследования кинетики разрушения материалов на стадиях зарождения и развития трещин (Обзор). *Там же*, 3, 26–34.
7. Недосека С. А. (1998) Причины возникновения повреждений и остаточный ресурс материала аварийного участка трубопровода Дашава-Киев. *Там же*, 1, 38–50.
8. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Там же*, 3, 7–14.
9. Скальський В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Там же*, 4, 29–36.
10. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Лебедев А. А. (1993) Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии. *Проблемы прочности*, 12, 14–21.
11. Stone D. E., Dingwall P. F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, 10, 51–56.
12. Nakamura Yosio, Veach C. L., McCauley B. O. (1971) Amplitude distribution of acoustic emission signals. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7–8 December, pp. 164–186.
13. Tetelman A. S., Chow R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials*. Bal Harbour, 7–8 December, pp. 30–40.



14. Beveridge A., Ham B., Rosenbrock L., Kriesl N. (2009) Acoustic emission monitoring of high energy piping. *IIW Annual assembly and international conference, 12–18 July 2009*. XI-926–09, Singapore.
15. (2015) 68-я ежегодная ассамблея международного института сварки IIW-2015. Хельсинки, Финляндия, *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 58

#### References

1. Bridgeman, N. (1955) *Investigation of large plastic deformations and rupture*. Moscow, Inostr. Lit-ra [in Russian].
2. Volkov, V.A. (1980) *Main results of basic experiment on fracture mechanics on low-strength steel. Problems of metal fracture*. Moscow, Znanie [in Russian].
3. Lebedev, A.A., Chausov, N.G. (1988) *Express-method of evaluation of crack resistance of ductile materials*. Kiev, AN Ukr.SSR [in Russian].
4. Nedoseka, A.Ya. (2018) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Indprom [in Russian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I., Alekseenko, T.A. (2018) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of damage accumulation at fracture of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **3**, 3-13 [in Russian].
6. Nedoseka, S.A. (1992) Method of acoustic emission as an effective tool for investigation of the kinetics of material fracture at the stages of crack initiation and propagation (Review). *Ibid.*, **3**, 26-34 [in Russian].
7. Nedoseka, S.A. (1998) Causes for damage initiation and residual life of the material of emergency section of Dasha-va-Kiev pipeline. *Ibid.*, **1**, 38-50 [in Russian].
8. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. *Ibid.*, **3**, 7-14 [in Russian].
9. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based on acoustic emission signals. *Ibid.*, **4**, 29-36 [in Russian].
10. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Lebedev, A.A. (1993) Investigation by acoustic emission method of the kinetics of steel fracture at final stages of deformation. *Problemy Prochnosti*, **12**, 14-21 [in Russian].
11. Stone, D.E., Dingwall, P.F. (1977) Acoustic emission parameters and their interpretation. *NDT Intern.*, **10**, 51-56.
12. Nakamura Yosio, Veach, C.L., McCauley, B.O. (1971) Amplitude distribution of acoustic emission signals. In: *Proc. of Symp. presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials (Bal Harbour, 7-8 December 1971)*, 164-186.
13. Tetelman, A.S., Chow, R. (1971) Acoustic emission testing and micro cracking processes. In: *Proc. of Symp. presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials (Bal Harbour, 7-8 December 1971)*, 30-40.
14. Beveridge, A., Ham, B., Rosenbrock, L., Kriesl, N. (2009) Acoustic emission monitoring of high energy piping. *IIW Annual Assembly and Intern. Conference (12-18 July 2009, Singapore)*. XI-926-09.
15. (2015) 68th Annual Assembly of the International Institute of Welding – IIW 2015 (Helsinki, Finland). *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **4**, 58.

#### ОЦІНКА ЕНЕРГІЇ, ЩО ВИТРАЧАЄТЬСЯ НА УТВОРЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ РУЙНУВАННІ МАТЕРІАЛІВ, НА ОСНОВІ ДАНИХ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

З огляду на те, що застосування акустичної емісії при безперервному моніторингу конструкцій при експлуатації дозволяє ефективно вирішувати цілий ряд питань забезпечення і управління їх безпеки, а використання інтернету забезпечує контроль цього процесу практично з будь-якої зовнішньої точки, все більшої актуальності набуває застосування методів оцінки стану матеріалів на основі даних акустичної емісії. Дані, отримані як при моніторингу реальних конструкцій, так і при випробуваннях зразків, показують, що для оцінки стану матеріалів конструкцій може становити інтерес енергія, пов'язана з деформацією матеріалу і утворенням в ньому пошкоджень. Виділення із загальної енергії руйнування частини, пов'язаної з утворенням пошкоджень, може істотно уточнити розрахунки на міцність і оцінити стан матеріалу в кожен момент часу його експлуатації під навантаженням. У даній роботі приведені можливості використання даних акустичної емісії по виділенню цієї частини енергії і показано, яку частину загальної енергії руйнування вона становить, її зв'язок з накопиченням пошкоджень структури матеріалу, які в процесі пошкоджуваності підсумовуються і, в кінцевому рахунку, призводять до руйнування. Бібліогр. 15, рис. 5.

Ключові слова: міцність матеріалів, енергія руйнування матеріалів, діагностика

#### EVALUATION OF ENERGY CONSUMED IN DAMAGE INITIATION AT FRACTURE OF MATERIALS, BASED ON ACOUSTIC EMISSION DATA

A.Ya. NEDOSEKA, S.A. NEDOSEKA

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

Considering that application of acoustic emission at continuous monitoring of structures in service allows effectively solving a whole range of questions to guarantee and manage their safety, and use of Internet ensures control of this process practically from any external point, application of methods for evaluation of the state of materials based on acoustic emission data is becoming ever more urgent. The data obtained both during monitoring of the real structures, and at testing samples, show that energy associated with material deformation and formation of damage in it, can be of interest for evaluation of the state of structure materials. Separation from the total fracture energy of the part associated with formation of damage, can provide much greater precision of strength analysis and enable evaluation of the state of material at each moment of time of its operation under load. This work demonstrates the possibilities of application of acoustic emission data, shows the part of the total fracture energy to which it amounts, and its relation to accumulation of damage in the material structure, which is summed up during the damaging process, and eventually leads to fracture. 15 Ref., 5 Fig.

Keywords: material strength, material fracture energy, diagnostics

Поступила в редакцию  
25.09.2018



# ВПЛИВ ЗАГЛИБИН ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

**В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. МОКРИЙ**

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

E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo2323@gmail.com

Експериментально показано значний вплив наявності заглибин поверхні елемента конструкцій на результати вимірювання розподілу швидкості поверхневих акустичних хвиль за використання п'єзоелектричних контактних перетворювачів із жорстким з'єднанням збуджуючої та реєструючої призми. Встановлено, що відхилення від площини спричинює появу додаткової затримки акустичного сигналу, що може призводити до суттєвої похибки вимірювання швидкості. Стверджується, що така часова затримка спричинена проходженням акустичного сигналу через додатковий шар контактної рідини, який виникає між призмою перетворювача та поверхнею досліджуваного матеріалу. Бібліогр.10, рис. 7.

*Ключові слова:* елементи конструкцій, поверхня, поверхневі акустичні хвилі

Зміна швидкості акустичних хвиль є ефективним інструментом діагностування стану металів і сплавів [1–3]. Особливо зручно тут використовувати поверхневі акустичні хвилі (ПАХ), оскільки на поверхні елемента конструкцій є доступ до його різних ділянок, в яких можна їх збуджувати та реєструвати. Величина швидкості ПАХ залежить від пружних модулів та густини середовища, в якому вона поширюється і є чутливою до багатьох процесів, які спричиняють її зміну. Вимірюючи швидкість ПАХ, можна досліджувати текстуру металу [4], залишкові механічні напруження [5], наявність різноманітних дефектів та структуру металу [3] тощо. Велика кількість чинників, що впливають на величину зміни швидкості ПАХ, з одного боку дозволяє використовувати її для діагностування стану металу, а з іншого ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

Ефективним для оцінювання стану металу є визначення розподілу швидкості ПАХ на поверхні елемента конструкції. Характер такого розподілу містить додаткову інформацію, яка може бути використана для діагностування. Часто різні ділянки елемента конструкції піддаються неоднорідним впливам температури, механічних напружень, хімічних та інших чинників. Звідси зміни стану металу проходять нерівномірно по його об'єму та площі поверхні. Порівнюючи швидкість ПАХ в різних ділянках, можна оцінити вплив фізичних чинників на стан металу. Наприклад, якщо існує певний розподіл циклічних механічних напружень в елементі конструкції, то можна оцінювати зміну стану металу під дією цих напружень на основі вимірювання розподілу швидкості ПАХ [3]. Іншим прикладом можуть бути неоднакові

зміни стану металу в верхній та нижній частинах трубопроводів, що відбуваються за рахунок різного хімічного впливу середовища, яке знаходиться в ньому. Ще одним прикладом використання вимірювання розподілу швидкості на поверхні досліджуваної конструкції є можливість оцінювати залишкові механічні напруження на основі акустопружного ефекту. Їх величина є, як правило, неоднорідна по об'єму конструкції, що дає можливість відділити зміну швидкості ПАХ, спричинену механічними напруженнями, від змін, які зумовлені іншими фізичними чинниками. Отже, вимірювання розподілу швидкості ПАХ по поверхні металу є дієвим інструментом для оцінки його стану, а розроблення методики є важливим та актуальним завданням. В багатьох випадках величина зміни швидкості ПАХ становить кілька відсотків і менше, що вимагає відповідної прецизійної методики вимірювань.

Ефективною методикою, яка дозволяє забезпечувати високу точність вимірювань є використання контактних п'єзоелектричних перетворювачів для збудження та реєстрації ПАХ, в яких збуджуюча та реєструюча частини пристрою жорстко з'єднані (рис. 1) [3, 6]. П'єзоелемент збуджує поздовжню акустичну хвилю, яка проходить призмю і на поверхні призма-метал трансформується в ПАХ. Пройшовши відстань між призмами, ПАХ на поверхні іншої призми перетворюється знову

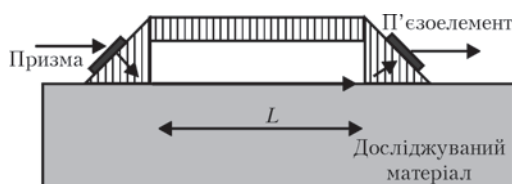


Рис. 1. Конструкція перетворювача з жорстким з'єднанням, L – база перетворювача

у об'ємну хвилю, яка реєструється приймальним п'єзоелементом. Перевагою таких перетворювачів є постійність відстані між збуджуючою та реєструючою призмами, що забезпечує стабільність бази вимірювань і позбавляє необхідності її постійно вимірювати.

Дана методика може бути використана для дослідження і контролю багатьох пошкоджень на поверхні металів. Разом з тим існують деякі загальні обмеження її застосування і одним із них є вплив нерівностей поверхні матеріалу на результат вимірювання розподілу швидкості ПАХ. Оцінка і врахування похибки вимірювання швидкості, яка спричинена нерівністю поверхні досліджуваного матеріалу, є важливою для практичного використання ПАХ в неруйнівному контролі, оскільки об'єкти контролю часто мають форму поверхні, яка відхиляється від площини. Для зменшення впливу локального відхилення форми рекомендують зменшити площу контактної ділянки перетворювача [3]. У роботі [7] досліджено вплив криволінійності поверхні на швидкість ПАХ. Разом з тим виникнення похибки вимірювання швидкості, яка пов'язана зі складною формою поверхні, недостатньо вивчено і, зазвичай, її вплив на результати вимірювань ігнорують [3, 8, 9]. Як показано далі, такий підхід може призвести до значних помилок під час вимірювання швидкості ПАХ.

В даній роботі проаналізовано вплив відхилення форми поверхні від площини на визначення швидкості ПАХ за використання перетворювача, в якому жорстко з'єднані випромінююча та приймальні призми. Розглядався випадок, коли поверхня досліджуваного елемента є плоскою і в ній створена локальна заглибина. Незначні відхилення від площини можуть призводити до зміни часу проходження акустичного сигналу і помилково трактуватись як локальна зміна швидкості ПАХ.

Можна припустити, що зміна часу проходження акустичної хвилі, спричинена відхиленням форми поверхні від площини, пов'язана з кількома механізмами. Один з них зумовлений зміною умов проходження акустичної хвилі із контактної ділянки збуджуючої призми перетворювача в зразок і навпаки – із зразка в приймальну призму перетворювача. Інші механізми спричинені зміною швидкості ПАХ на криволінійній поверхні твердого тіла і зміною довжини шляху, який прохо-

дить хвиля. Проводиться вивчення впливу нерівності поверхні на вимірювання швидкості ПАХ лише за механізмом, який спричинений зміною умов проходження акустичної хвилі із перетворювача в досліджуваний матеріал і навпаки. Розмір нерівності поверхні приймався більшим за контактну ділянку призми перетворювача.

**Методика досліджень.** Для вивчення впливу відхилення форми поверхні зразка від площини використовували зразки розміром  $150 \times 15 \times 10$  мм із маловуглецевої сталі, в яких були створені локальні заглибини глибиною  $0,1 \dots 0,5$  мм і поперечним розміром  $8 \dots 16$  мм. (рис. 2). Використовували жорстко з'єднаний перетворювач із розміром контактних ділянок збуджуючої і реєструючої призми  $5$  мм і відстанню між ними  $L = 20$  мм (рис. 1). Вимірювали зміну часу проходження акустичного сигналу залежно від положення перетворювача на поверхні зразка відносно заглибини. В якості контактної рідини використовували гліцерин, масло І-20, евкаліптове масло. Акустичну хвилю збуджували у вигляді радіоімпульсу тривалістю кілька мікросекунд і частотою заповнення  $3$  МГц. Похибка визначення часу проходження акустичного сигналу становила  $4$  нс. Використовували методику вимірювання часу затримки сигналу, описану у праці [10]. Досліджували розподіл швидкості ПАХ вздовж прямої, яка проходила через ділянку із заглибиною. Перетворювач пересували в напрямку поширення ПАХ з дискретністю  $1$  мм і вимірювали час проходження акустичного сигналу по шляху: збуджуюча частина перетворювача – поверхня зразка – приймальна частина перетворювача. Положення перетворювача визначали за координатою його краю.

На рис. 3 показано результати розподілу зміни часу проходження акустичного сигналу від положення перетворювача на поверхні матеріалу. На графіках спостерігали два максимуми, величина яких зростає із ростом глибини заглибини. Ці максимуми часової затримки акустичного сигналу виникають, коли контактні ділянки призми перетворювача співпадають з місцем заглибини. Оскільки перетворювач послідовно пересувають по поверхні матеріалу, то на початку графіка його контактні поверхні повністю лежать на плоскій ділянці зразка і час проходження ПАХ по зразку в цьому положенні приймається за нульовий рівень. З подальшим переміщенням перетворювача приймальна частина насувається на заглибину, час проходження сигналу зростає і після того, як вона проходить її, знову зменшується. За подальшого переміщення перетворювача його призми знаходяться на плоскій ділянці зразка, а заглибина знаходиться між ними. Зміщуючи перетворювач далі по поверхні, на ділянку впадини насувається інша призма перетворювача, що знову супрово-

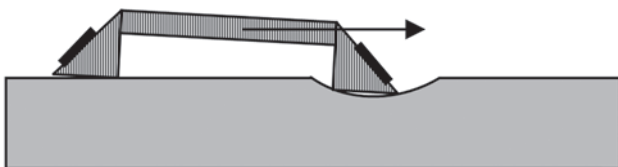


Рис. 2. Розміщення перетворювача на поверхні зразка із заглибиною. Стрілкою показано напрям переміщення перетворювача

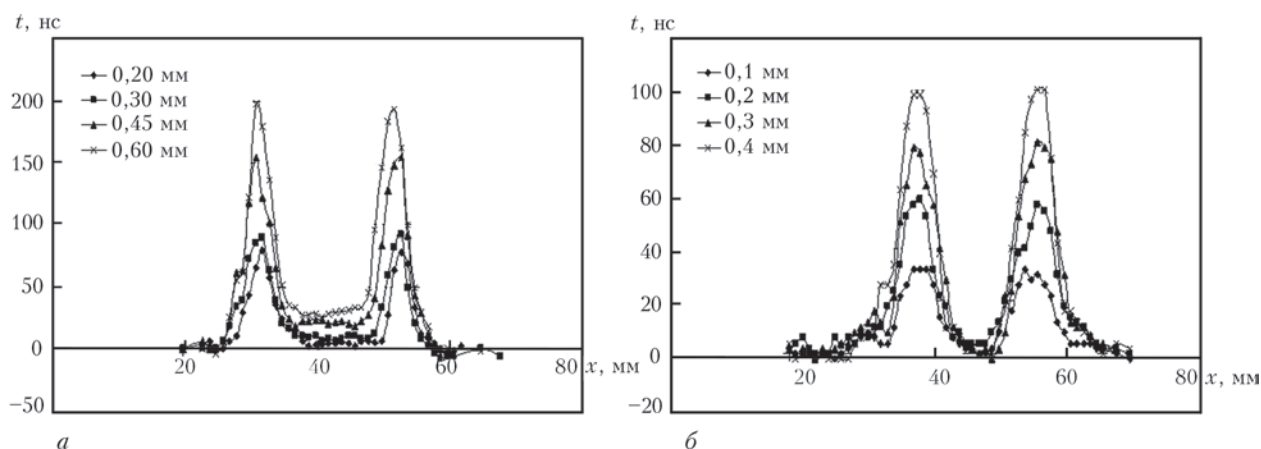


Рис. 3. Залежність часового зміщення проходження акустичного сигналу через жорстко з'єднаний перетворювач залежно від його положення за наявності заглибини на поверхні зразка: а – ширина заглибини 8 мм; б – 16; цифри на графіку показують її глибину

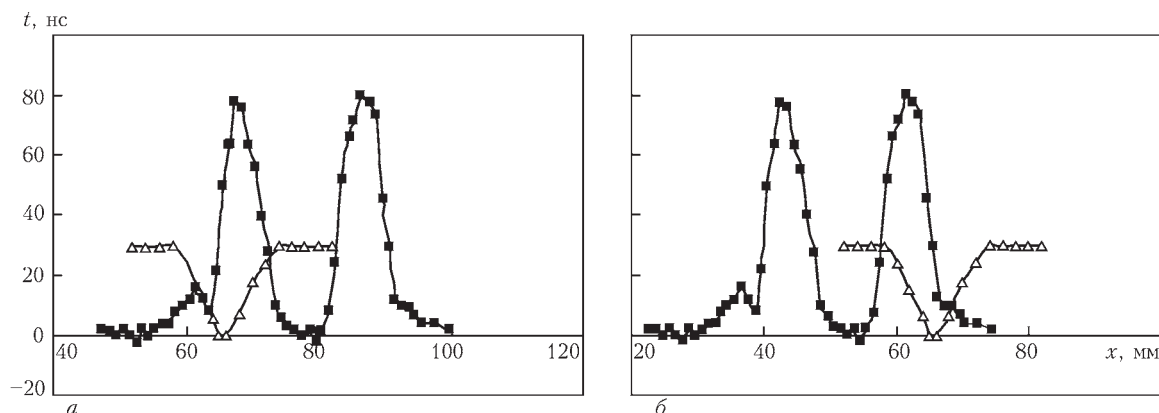


Рис. 4. Взаємне розміщення заглибини на поверхні зразка та часового зміщення акустичного сигналу від положення перетворювача. а – часове зміщення залежно від координати правої призми перетворювача, б – часове зміщення залежно від координати лівої призми перетворювача, ■ – часове зміщення, ▲ – форма заглибини

джується збільшенням часового зміщення проходження сигналу. Таким чином, наявність впадини на поверхні зразка спричиняє часову затримку акустичного сигналу, яка залежить від взаємного розміщення призм перетворювачів та заглибини. На рис. 3 приведені результати для заглибин двох розмірів: 8 і 16 мм. Як видно з графіків, часова затримка зростає із ростом глибини заглибини і зменшується з ростом її ширини.

Для більш детального аналізу механізму виникнення часового зміщення на рис. 4 приведено залежності цього зміщення від координат центру правої (а) і лівої (б) контактних ділянок призм перетворювача відносно форми поверхні зразка. На рис. 4, а видно, що положення першого часового максимуму співпадає з правою частиною заглибини, тобто часовий зсув виникає, коли права призма перетворювача проходить через праву частину заглибини. Відповідно на рис. 4, б максимум співпадає з лівою частиною заглибини. Це дає підстави вважати, що наявність двох максимумів пов'язана з існуванням двох призм в перетворювачі. Кожна з призм дає збільшення часу проходження сигналу, коли їх положення співпадає із нахиленою ділянкою поверхні матеріалу, причому для різних призм нахил поверхні є різного знаку.

Оскільки часове зміщення акустичного сигналу пов'язано із проходженням ним шару контактної рідини, то були проведені дослідження із використанням різних її видів. Результати експерименту для заглибини глибиною 0,3 мм і шириною 16 мм показані на рис. 5. Використовували контактні рідини з різною швидкістю поширення акустичних хвиль. Так, в гліцерині швидкість становить 1920 м/с, в маслі І-20 – 1500 м/с, в евкаліптовому маслі – 1270 м/с. Аналогічні дослідження були проведені для заглибин 0,1, 0,2 та 0,4 мм. В усіх випадках спостерігається збільшення часової затримки зі зменшенням швидкості акустичної хвилі контактної рідини.

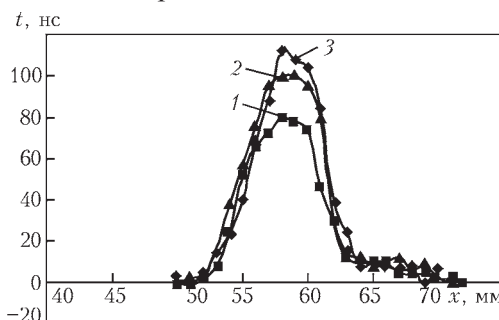


Рис. 5. Розподіл часового зсуву проходження акустичного сигналу для різних контактних рідин: 1 – гліцерин; 2 – масло І-20; 3 – евкаліптове масло



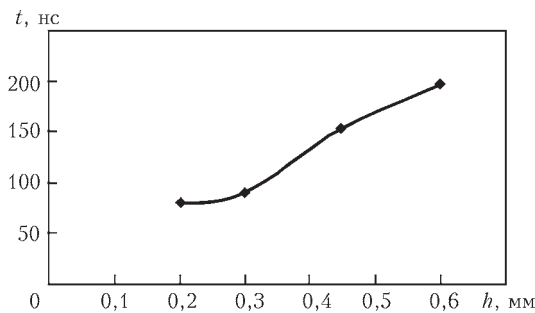


Рис. 6. Залежність максимуму часового зміщення від глибини заглибини;  $h$  – глибина заглибини

**Аналіз отриманих результатів.** Як видно з результатів проведених експериментів, нерівності поверхні, які більші за розмір робочої ділянки збуджуючої і приймаючої частин перетворювача, можуть сильно вплинути на результат вимірювання часової затримки сигналу. Якісно виникнення додаткової часової затримки можна пояснити так. У випадку наявності зміни кривини поверхні матеріалу виникає щілина між поверхнею контактної ділянки перетворювача та поверхнею досліджуваного матеріалу. Ця щілина заповнюється контактною рідиною і акустична хвиля повинна пройти додатково шар цієї рідини, що спричинює часову затримку сигналу. Відповідно величина часової затримки визначається кутом нахилу контактної ділянки перетворювача відносно поверхні матеріалу. На рис. 6 приведено залежність величини часової затримки сигналу від глибини заглибини. Видно, що спостерігається монотонна, майже лінійна залежність між цими величинами. Це пояснюється тим, що зі збільшенням глибини заглибини зростає розмір щілини між поверхнею призми перетворювача та поверхнею досліджуваного матеріалу.

Важливим також є положення цієї щілини відносно призми перетворювача. На рис. 7 схематично показані чотири можливі положення перетворювача відносно заглибини. Оскільки в ділянці контакту поверхні призми перетворювача та матеріалу є непаралельні, то контакт відбувається тільки одним ребром призми. Як видно з рис. 7, для кожної призми перетворювача контакт матеріалу може бути або з ребром ближнім до п'єзоелемента (наприклад, права призма в положенні 2 на рис. 7), або з протилежним до п'єзоелемента ребром (наприклад, обидві призми в положенні 1 на рис. 7). Залежно від того, яким ребром призма контактує з поверхнею матеріалу, величина додаткового часового зміщення має різну величину. Як показано на рис. 1, акустична хвиля проходить в призму з протилежного від п'єзоелемента боку. Тому за контакту із матеріалом протилежного від п'єзоелемента ребра, час проходження акустичного сигналу практично не збільшується. У випадку контакту призми з ребром, ближнім до п'єзоелемента, виникає щілина, яка заповнюється-

ся контактною рідиною і яку повинна пройти додатково акустична хвиля. Залежності, показані на рис. 4, підтверджують правильність міркувань. На рис. 4, а показано залежність приросту часу проходження сигналу від положення правої призми перетворювача, а на рис. 4, б – лівої. Видно, що максимум часового приросту виникає, коли права призма перетворювача знаходиться в положенні, що відповідає позиції 2 на рис. 7. Відповідно положення лівої призми призводить до додаткової часової затримки, коли вона знаходиться в позиції 3 рис. 7. Таким чином, збільшення часу проходження акустичної хвилі відбувається тільки у випадку, коли призма перетворювача контактує з поверхнею матеріалу ребром, протилежним до п'єзоелемента. Ці експериментальні результати підтверджують пояснення виникнення часової затримки акустичного сигналу.

Оскільки затримка акустичного сигналу пропорційна часу проходження акустичної хвилі через шар контактної рідини, то вона залежить від швидкості акустичної хвилі в рідині. На рис. 5 приведена залежність часової затримки акустичного сигналу від типу контактної рідини. Спостерігається монотонне збільшення часу затримки акустичного сигналу зі зменшенням швидкості акустичної хвилі в контактній рідині, що підтверджує правильність тлумачення запропонованого механізму зміни часу проходження акустичної хвилі.

На основі врахування швидкості акустичних хвиль в контактних рідинах та відповідних величин часових затримок можна розрахувати ефективну товщину їх шару. Значення товщини цього

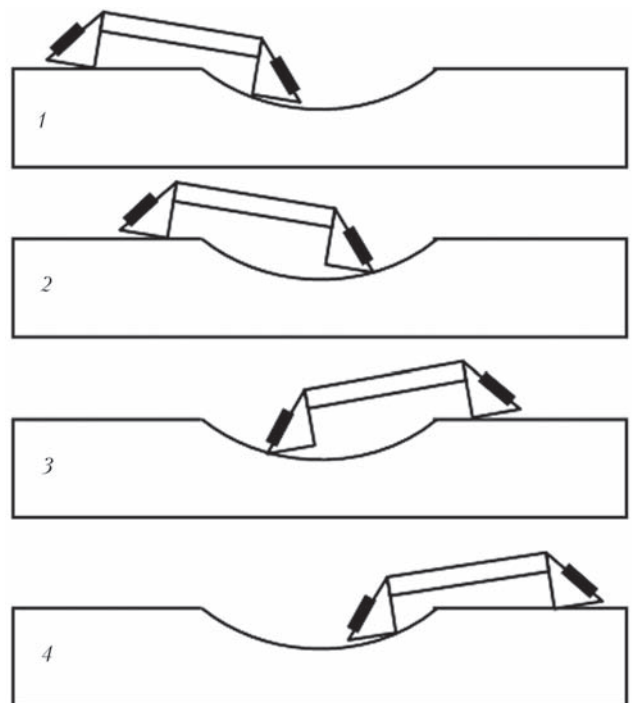


Рис. 7. Можливі положення перетворювача відносно заглибини

шару узгоджується із розміром щілини між призмюю перетворювача та поверхнею зразка. Наприклад, для заглибини глибиною 0,3 мм розрахована ефективна товщина шару контактної рідини становить 0,15 мм, а товщина клиновидної щілини між перетворювачем та зразком змінюється від 0 до 0,23 мм. Отримана залежність часової затримки від величини швидкості акустичної хвилі в контактній рідині вказує на можливість зменшити вплив нерівності поверхні шляхом підбору відповідної рідини. Можна рекомендувати використання контактної рідини із великою швидкістю поширення акустичних хвиль для зменшення часової затримки, спричиненої нерівністю поверхні.

На основі отриманих експериментальних результатів можна зробити висновок про значний вплив нерівності поверхні на результати вимірювання швидкості. Похибка вимірювання часу проходження ПАХ може становити, залежно від форми заглибини і типу контактної рідини, десятки і сотні наносекунд. Для нашого перетворювача із величиною бази вимірювання 20 мм час проходження ПАХ для сталі становить 6,7 мкс. Відповідно похибка вимірювання часу, спричинена формою поверхні, може перевищувати 1 %, що є значною величиною, оскільки часто досліджувані ефекти призводять до зміни швидкості, яка є меншою кількох відсотків. Таким чином, за наявності відхилення форми поверхні від площини необхідно враховувати можливий її вклад у зміну часу проходження акустичного сигналу.

### Висновки

Вплив нерівності поверхні досліджуваного матеріалу на вимірювання швидкості ПАХ проявляється у додатковій часовій затримці сигналу.

Виникнення часової затримки проходження акустичного сигналу внаслідок нерівності поверхні відбувається за рахунок часу проходження акустичного сигналу через додатковий шар контактної рідини.

Часова затримка акустичного сигналу залежить від типу контактної рідини, яка використовується. Для зменшення похибки вимірювання швидкості ПАХ на поверхні із нерівностями пропонується використовувати контактну рідину з якомога більшою швидкістю поширення акустичних хвиль.

Часова затримка, спричинена відхиленням форми досліджуваного матеріалу від площини, може становити суттєву величину і повинна бути врахована під час визначення швидкості ПАХ.

### Список літератури

1. Скальський В. Р., Назарчук З. Т., Гірний С. І. (2012) Вплив електролітично поглиненого водню на модуль Юнга конструкційної сталі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **4**, 68–75.
2. Запорожец О. И., Дордиенко Н. А., Михайловский В. А. (2016) Акустические и упругие свойства составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440. *Металлофизика и новейшие технологии*, **6**, 795–813.

3. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Новосибирск, Наука.
4. Levesque D., Lim C. S., Padioleau C., Blouin A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *Journal of Physics: Conference Series*, **278**, 1–4.
5. Пуро А. Э. (1996) Акустическая томография поверхностных напряжений. *Акустический журнал*, **42**, **1**, 112–115.
6. Johnson C. (1993) The spatial resolution of Rayleigh wave acoustoelastic measurement of stress. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol.12 Edited by Thompson and D.E. Chimenti, New York, Plenum Press, 2121–2128.
7. Викторов И. А. (1981) *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. Москва, Наука.
8. The Stress State Identification of Critical Bridge Component using Nonlinear Acoustic (2014). *Final Report for NCHRP IDEA*, Project 158.
9. Mokryy O., Tsyurulnyk O. (2016) Technique for Measuring Spatial Distribution of the Surface Acoustic Wave Velocity in Metals. *Archives of Acoustics*, **4**, 741–746.
10. Мокрый О. М., Кошовый В. В., Семак П. М. (2014) Методика вимірювання швидкості поверхневих акустичних хвиль для діагностики стану металу. *Відбір і обробка інформації*. **41**(117), 43–48.

### References

1. Skalsky, V.R., Nazarchuk, Z.T., Gigny, S.Y. (2012) Effect of electrolytically absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steel. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, **4**, 68–75 [in Ukrainian].
2. Zaporozhets, O.I., Dordienko, N.A., Mikhajlovsky, V.A. (2016) Acoustic and elastic properties of the components of WWER-440 reactor vessel wall. *Metallfizika i Novejschie Tekhnologii*, **6**, 795–813 [in Russian].
3. Muraviov, V.V., Zuev, L.B., Komarov, K.L. (1996) *Velocity of sound and structure of steel and alloys*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
4. Levesque, D., Lim, C.S., Padioleau, C., Blouin, A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *J. of Physics: Conference Series*, **278**, 1–4.
5. Puro, A.E. (1996) Acoustic tomography of surface stresses. *Akusticheskij Zhurnal*, **42**(1), 112–115 [in Russian].
6. Johnson, C. (1993) The spatial resolution of Rayleigh wave acoustoelastic measurement of stress. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol. 12. Ed. by Thompson and D.E. Chimenti, New York, Plenum Press, 2121–2128.
7. Viktorov, I.A. (1981) *Sound surface waves in solid bodies*. Moscow, Nauka [in Russian].
8. (2014) The stress state identification of critical bridge component using nonlinear acoustic. *Final Report for NCHRP IDEA*, Project 158.
9. Mokryy, O., Tsyurulnyk, O. (2016) Technique for measuring spatial distribution of the surface acoustic wave velocity in metals. *Archives of Acoustics*, **4**, 741–746.
10. Mokry, O.M., Koshovy, V.V., Semak, P.M. (2014) Procedure of measurement of the velocity of surface acoustic waves for diagnostics of metal state. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **41**(117), 43–48 [in Ukrainian].

### ВЛИЯНИЕ УГЛУБЛЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, О. М. МОКРЫЙ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo2323@gmail.com

Експериментально показано значительное влияние наличия углублений поверхности элемента конструкций на результаты измерения распределения скорости поверхностных акустических волн при использовании пьезоэлектрических контактных



преобразователей с жестким соединением возбуждающей и регистрирующей призм. Установлено, что отклонение от плоскости служит причиной появления дополнительной задержки акустического сигнала, что может приводить к существенной погрешности измерения скорости. Утверждается, что такая временная задержка вызвана прохождением акустического сигнала через дополнительный слой контактной жидкости, который возникает между призмой преобразователя и поверхностью исследуемого материала. Библиогр. 10, рис. 7.

Ключевые слова: элементы конструкций, поверхность, поверхностные акустические волны

# INFLUENCE OF DEPRESSIONS ON THE SURFACE OF STRUCTURAL ELEMENTS ON MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF SURFACE ACOUSTIC WAVES

V.R. SKALSKII, O.M. MOKRYI

G.V.Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine,  
5 Naukova Str., Lviv, E-mail: skalsky.v@gmail.com,  
mokomo2323@gmail.com

The considerable impact of presence of depressions on the surface of a structural element on the results of measurement of distribution of surface acoustic wave velocity was shown experimentally for the case of application of piezoelectric contact transducers with rigid coupling of the exciting and recording prisms. It is found that deviations from a plane result in an additional delay of the acoustic signal that may lead to a significant error in velocity measurement. It is stated that a temporary delay is caused by acoustic signal passing through an additional layer of couplant that forms between the transducer prism and studied material surface. 10 Ref., 7 Fig.

Keywords: structural elements, surface, surface acoustic waves

Надійшла до редакції  
31.05.2018



## THE 72<sup>ND</sup> IIW ANNUAL ASSEMBLY AND INTERNATIONAL CONFERENCE

Bratislava, Slovakia

7<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup> July 2019

The annual event of the International Institute of Welding IIW 2019

[www.iiw2019.com](http://www.iiw2019.com)



The main topic of the International Conference:

## New Progressive Materials and Welding Methods in the Automotive Industry



Hosted by

Conference Secretariat





## МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИМІРЮВАЛЬНОМУ КАНАЛІ ВИХРОСТРУМОВОГО ДЕФЕКТОСКОПУ

В. В. ДОЛИНЕНКО<sup>1</sup>, С. В. ШАПОВАЛОВ<sup>1</sup>, Ю. В. КУЦ<sup>2</sup>, М. О. РЕДЬКА<sup>2</sup>, В. М. УЧАНІН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

<sup>3</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.  
E-mail: [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

Розроблено імітаційну модель аналогової частини вимірювального тракту дефектоскопу, призначеного для використання в автоматизованих системах вихрострумowego контролю, а також віртуальний стенд та методику для її випробувань. На розробленій моделі виконано дослідження перехідних процесів в аналоговому тракті дефектоскопу для різних типів вхідних вихрострумowych перетворювачів. Результати досліджень можуть бути використані для коригування алгоритмів автоматичного калібрування і опрацювання інформаційних сигналів та прийняття рішень в автоматизованих системах вихрострумowego контролю. Бібліогр. 12, рис. 9.

*Ключові слова:* автоматичний вихрострумовой дефектоскоп, вихрострумовой сигнал, імітаційна модель, амплітуда і фазова модуляція, перехідний процес

Вихрострумовой неруйнівний контроль (ВСНК) [1, 2] виробів з електропровідних матеріалів є важливою складовою в структурі технологічних процесів їх виготовлення та обслуговування. Поява нових конструкційних матеріалів, удосконалення технологічних процесів, більш жорсткі умови експлуатації виробів, необхідність підвищення продуктивності контролю – все це стимулює процес удосконалення існуючих та розроблення нових методів за засобів ВСНК, які орієнтовані на виключення впливу людського фактору, забезпечення підвищення вірогідності та надійності результатів контролю та діагностування [3–5].

В умовах зростання обсягів промислового виробництва, підвищення вимог до якості продукції та її конкурентоздатності, збільшення обсягів операцій ВСНК завдання автоматизації неруйнівного контролю [6] стає в ряд першочергових. В роботі [7] наведено приклади автоматизованих систем ВСНК для виявлення дефектів на внутрішній і зовнішній поверхнях труб печей вторинного риформінгу, комплексного контролю колісних пар, прокату з алюмінієвих сплавів, торцевих зварних з'єднань та ін. Зручність ВСНК для автоматизації забезпечується тим, що він реалізується без фізичного контакту вихрострумowego перетворювача (ВСП) та об'єкту контролю (ОК). Взаємодія останніх зазвичай відбувається на відстанях, достатніх для вільного руху ВСП відносно ОК (від часток міліметра до декількох міліметрів) з високою швидкістю.

Ще більш широкі можливості надає поєднання промислових роботів-маніпуляторів [8], сучасних

інформаційно-вимірювальних технологій і методів цифрового оброблення інформаційних сигналів ВСНК. Структура такої системи запропонована у роботі [9].

Аналіз робіт за вказаною тематикою [6–11] засвідчив, що питання опрацювання інформаційних сигналів в таких системах здебільшого лишається поза увагою авторів. В той же час дефектоскопи для роботизованих систем ВСНК повинні забезпечувати можливість роботи в динамічному режимі. Мета статті полягає у створенні імітаційної моделі аналогової частини вимірювального тракту вихрострумowego дефектоскопу роботизованої системи неруйнівного контролю і дослідженні на цій моделі особливостей процесу опрацювання сигналів ВСП.

Актуальність цього завдання обумовлена тим, що процес виявлення ознак дефектів, які формуються на основі аналізу отримуваних у динамічному режимі роботи сигналів ВСП зі складними законами модуляції їх параметрів, ускладнюється дією перехідних процесів в електронних трактах дефектоскопів. Останні містять інтегральні електронні компоненти, параметри яких регулюються програмно в широких межах, що впливає на стійкість роботи вимірювальних каналів таких засобів.

*Основні результати.* Методика розв'язання поставленого завдання включала наступні етапи:

1. Аналіз умов отримання сигналів ВСП та власне сигналів ВСП.
2. Аналіз апаратної реалізації вхідного тракту вимірювального каналу вихрострумowego дефектоскопу.

3. Створення імітаційної SIMULINK-моделі електричної схеми вхідного тракту вихрострумового дефектоскопу.

4. Створення імітаційної SIMULINK-моделі стенду для дослідження параметрів перехідних процесів на моделі тракту дефектоскопу.

5. Дослідження перехідних процесів у вимірювальному каналі вихрострумового дефектоскопу на створених SIMULINK-моделях та обговорення отриманих результатів.

1. Експериментальні сигнали отримувались в роботизованій системі ВСНК, загальна структура якої наведена в роботі [9]. В системі використано ВСП подвійного диференціювання типу МДФ 1502 [7]. Цей ВСП дозволяє проводити контроль з великим (до 7 мм залежно від розміру дефекту) зазором відносно поверхні ОК, що важливо для створення автоматизованих систем контролю.

Загальний вигляд контрольного зразка та ВСП наведено, відповідно, на рис. 1, а, б. Контрольний зразок (рис. 1, а) уявляв собою металеву пластину (завтовшки 8 мм, матеріал – сталь 20) прямокутної форми зі штучним дефектом типу «тріщина» глибиною 1,2 мм. Сканування поверхні контрольного зразка виконувалось промисловим роботом «FANUC» у поперечному напрямку відносно осі тріщини зі швидкістю 100 мм/с, робочий зазор між зразком і ВСП – 1,5 мм, частота збудження ВСП – 2 кГц, амплітуда струму збудження ВСП – 110 мА.

На рис. 2 наведено фрагмент осцилограми сигналу ВСП, отриманого під час сканування ділянки контрольного зразка з дефектом. На цьому ри-

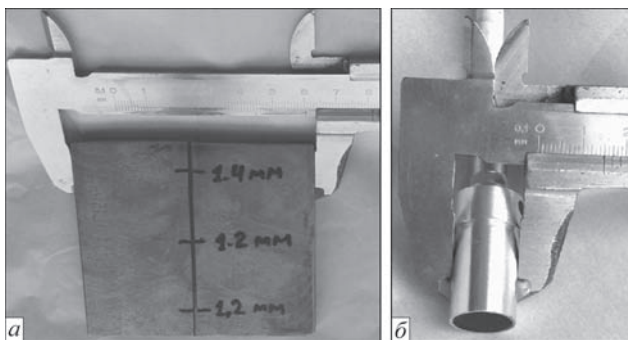


Рис. 1. Контрольний зразок (а) і ВСП (б)

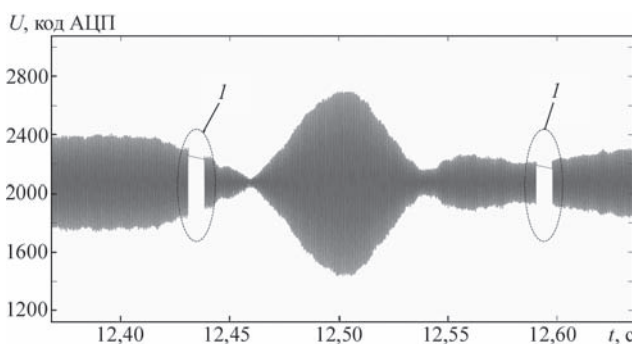


Рис. 2. Фрагмент досліджуваного сигналу: I – паузи у сигналі ВСП, що обумовлені передачею даних по мережі Ethernet

сунку темним тоном відображено сигнал-носій частотою 2 кГц, амплітуда якого модульована, що свідчить про наявність дефекту в зоні контролю. Обвідна сигналу під час перетину дефекту ВСП набуває дзвоноподібної форми (центральна ділянка фрагмента сигналу на рис. 2). По обидві сторони ділянки сигналу від дефекту спостерігається некомпенсована частина сигналу збудження ВСП. Така «квазіабсолютна» форма сигналу від дефекту є характерною для ВСП подвійного диференціювання [7].

В процесі модельних експериментів відтворювались сигнали ВСП з граничними значеннями параметрів, що змінювались в імпульсному режимі.

2. На другому етапі було проаналізовано апаратну реалізацію вхідного тракту вимірювального каналу вихрострумового дефектоскопу, що необхідно для створення його імітаційної моделі.

Структура тракту розробленого дефектоскопу представляється у вигляді каскадного з'єднання ряду електронних вузлів, які забезпечують підсилення і частотну фільтрацію сигналу (рис. 3). Наведена структура забезпечує регулювання в широких межах коефіцієнта підсилення  $K_n$  і частоту налаштування фільтрів, що залежить від робочих умов і частоти сигналу збудження вихрових струмів.

Тракт первинного оброблення сигналу вихрових струмів складається з шести каскадів:

- вхідного ланцюга захисту від перевантажень за напругою (ВЛЗ);
- фільтра низьких частот (ФНЧ), коефіцієнт підсилення якого регулюється програмно за допомогою команд інтерфейсу SPI;
- підсилювача ( $\Pi_1$ ), що погоджує рівні сигналів ФНЧ і СФ;
- смугового фільтру (СФ), центральна частота якого налаштовується програмно за допомогою зовнішнього сигналу  $F_{\text{сф}}$ ;
- підсилювача ( $\Pi_2$ ), коефіцієнт підсилення якого регулюється програмно за допомогою аналогового сигналу AOUI;
- підсилювача ( $\Pi_3$ ), що погоджує рівні сигналів  $\Pi_2$  і АЦП.

Каскад ФНЧ реалізовано на інтегральній мікросхемі типу LTC6602 («Linear Technology») за схемою фільтра низьких частот Баттерворта 4-го порядку і налаштовано на частоту 80 кГц (на рівні 3 дБ). Його коефіцієнт підсилення може дорівнювати одному зі значень: 1, 16, 256 або 1024. Цей каскад дозволяє передавати сигнали ВСП в діапазоні до 40 кГц.

Каскад СФ, який реалізовано на інтегральній мікросхемі типу LTC1068 («Linear Technology»), забезпечує зменшення рівня шумів у аналізованому сигналі. СФ побудовано за схемою смугового

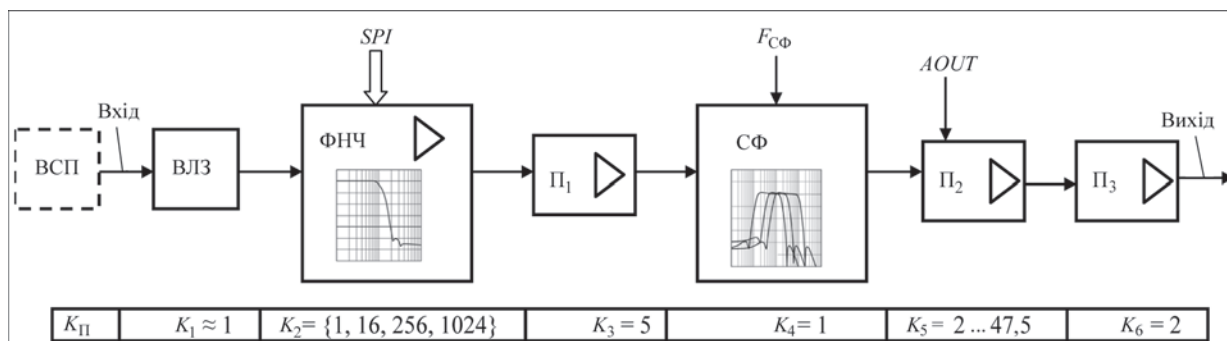


Рис. 3. Структура вхідного тракту вихрострумового дефектоскопу

фільтру Баттерворта 8-го порядку. У СФ забезпечена можливість зміни центральної частоти в діапазоні від 100 Гц до 40 кГц.

Каскад підсилювача  $\Pi_2$  реалізовано на інтегральній мікросхемі типу AD8337 («Analog Devices»), яка дає змогу регулювати коефіцієнт підсилення  $K$  в інтервалі значень  $2 \dots 47,5$ .

Розглянута структура вхідного тракту дефектоскопу дозволяє адаптуватися в певних межах до рівня сигналу ВСП.

3. На третьому етапі було розроблено імітаційну MATLAB/SIMULINK-модель електричної схеми вхідного тракту вихрострумового дефектоскопу.

Як відомо, Simulink – це графічне інтерактивне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, нелінійні і розривні системи [12]. Це середовище є зручним інструментом моделювання, оскільки дає змогу використовувати вже готові бібліотеки блоків для моделювання механічних, гідравлічних, електричних і радіотехнічних систем, а також застосовувати розвинений модельно-орієнтований підхід для розроблення систем управління, засобів неруйнівного контролю і пристроїв реального часу.

Розроблену імітаційну SIMULINK-модель електричної схеми вхідного тракту дефектоскопу зображено на рис. 4. Вхідний тракт складається з елементів типу «RC-chain», «Gain» «LP filter» і «BP Filter». Елементи RC-chain 1...RC-chain 5 імітують присутність в електричній схемі перехідних конденсаторів. SIMULINK-модель цих елементів

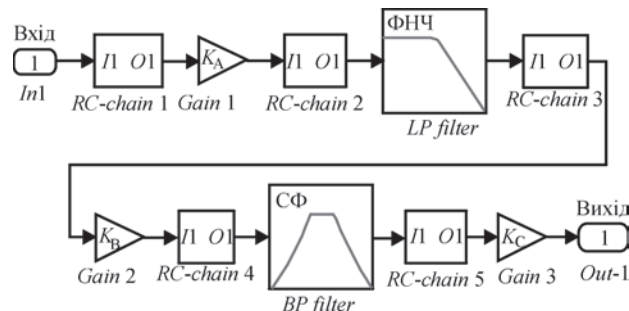


Рис. 4. SIMULINK-модель електричної схеми вхідного тракту вихрострумового дефектоскопу

показано на рис. 5. Резистор R1 імітує навантаження наступного каскаду.

В моделі елемента «RC-chain 1» задано параметри  $C1 = 1$  мкф і  $R1 = 200$  кОм, а в моделях «RC-chain 2»...«RC-chain 5» –  $C1 = 1$  мкф і  $R1 = 500$  кОм. Елементи «Import voltage», «Outport» і «Configuration» виконують функцію узгодження роботи електричного RC-ланцюжка з іншими елементами моделі.

На рис. 4 також показано елементи Gain1..Gain3, що імітують роботу безінерційних підсилювачів напруги з коефіцієнтами підсилення  $K_A$ ,  $K_B$  і  $K_C$ ; елемент «LP filter» імітує роботу ФНЧ, а елемент «BP filter» – роботу СФ. Загальний коефіцієнт підсилювання вхідного тракту  $K_0$  визначається трьома коефіцієнтами:

$$K_0 = K_A K_B K_C,$$

де  $K_A = K_1 \times K_2$ ,  $K_B = K_3 \times K_4$  і  $K_C = K_5 \times K_6$ . Максимальне значення амплітуди сигналу на вході тракту складає біля 3 мВ.

ФНЧ реалізовано за схемою фільтра Баттерворта 4-го порядку і налаштовано на частоту 80 кГц (на рівні 3 дБ). СФ реалізовано за схемою фільтра Баттерворта 8-го порядку, і налаштовано на центральну частоту 2 кГц. Нерівномірність амплітудно-частотної характеристики обох фільтрів задано на рівні 0,5 дБ.

4. Для дослідження перехідних характеристик вхідного тракту дефектоскопу було розроблено SIMULINK-модель віртуального стенду, який зображено на рис. 6. Цей стенд дає можливість формувати сигнали ВСП різної форми, виконувати їх амплітудну і фазову модуляцію/маніпуляцію, а також виконувати демодуляцію досліджуваних сигналів.

Наведені на рис. 6 вузли «Eddy current amplifier 1» – «Eddy Current Amplifier 3» є ідентич-

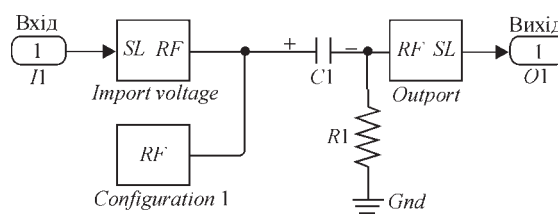


Рис. 5. SIMULINK-модель перехідних конденсаторів



ними і відповідають наведеній на рис. 4 моделі. Інші вузли мають таке призначення:

«Pulse generator» – формує імпульси прямокутної форми амплітудою 1 В;

«Zero-order hold 1»÷ «Zero-order hold 4» – функціональні елементи часових екстраполяторів нульового порядку;

«Gain 1», «Gain 2» – елементи підсилювання сигналу за амплітудою;

«PM modulator passband» – фазовий модулятор; «PM demodulator 1» – «PM demodulator 2» – фазові демодулятори;

«Scope 1» – «Scope 3» – елементи візуалізації сигналів (осцилоскопи);

«Sine wave step» – генератор синусоїдного сигналу, амплітуда якого контролюється зовнішнім сигналом.

5. Перевірка працездатності розробленої імітаційної моделі і дослідження перехідних процесів

у вимірювальному каналі вихрострумового дефектоскопу на створених SIMULINK-моделях здійснювалися шляхом аналізу відгуку схеми на входні сигнали різної форми. В дослідях використані наступні налаштування симуляції: «Solver selection» – «Type/Fixed-step», «Solver/ode4»(Runge-Kutta); «Fixed-step size/1 мкс». В схемі на рис. 6 в колах позначені точки, в яких здійснювався контроль сигналів.

5.1. Дослідження реакції схеми на прямокутний імпульсний сигнал. На рис. 7 зображено осцилограми сигналів в точках  $P_A$  (рис. 7, а) і  $P_E$  (рис. 7, б), на яких позначено  $U_{вх}$ ,  $U_{вих}$  – відповідно вхідний і вихідний сигнали.

На рис. 5 показано, що імпульсний сигнал амплітудою 3 мВ і тривалістю 10 мс, що подано на вхід тракту підсилювання, викликає на його виході формування двох сигналів, що мають коливальний загасаючий характер з амплітудою в межах 0...0,8 В. Тривалість цих сигналів  $t_1$  (на рівні 5 % від максимальної амплітуди) дорівнює ~ 8 мс.

5.2. Дослідження перехідного процесу в схемі за надходження сигналу з амплітудною модуляцією. Значення частоти сигналу-носія – 2 кГц.

Осцилограми сигналів в точках  $P_B$  і  $P_F$  показані відповідно на рис. 8, а та рис. 8, б. Схема збуджується амплітудно-маніпульованим сигналом, який на інтервал часу тривалістю 10 мс змінює амплітуду з 0,5 до 2,5 мВ. Вихідний сигнал є амплітудно-модульованим, що змінює свою амплітуду в цьому ж інтервалі, але фронт і спад зміни мають кінцеві значення. Реакція на стрибок амплітуди має характер перерегулювання величиною приблизно 12 %. Час встановлення вихідного сигнала

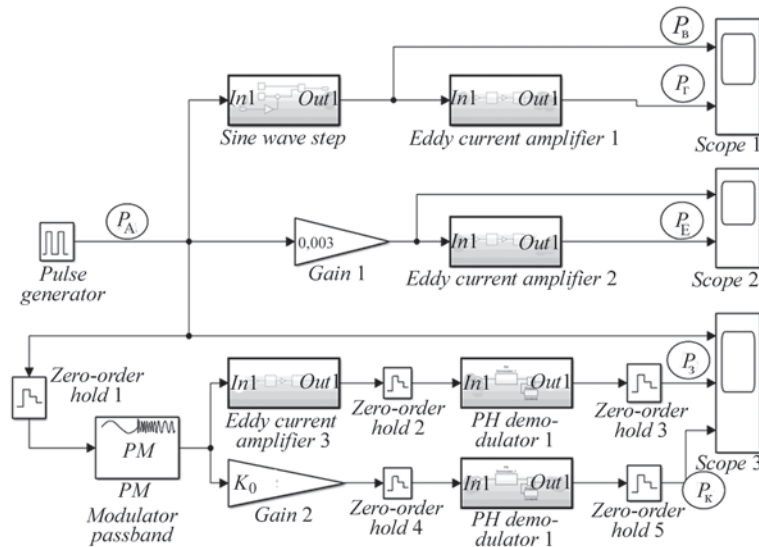


Рис. 6. Імітаційна SIMULINK-модель стенду, призначеного для дослідження параметрів перехідного процесу у вхідному тракті дефектоскопа

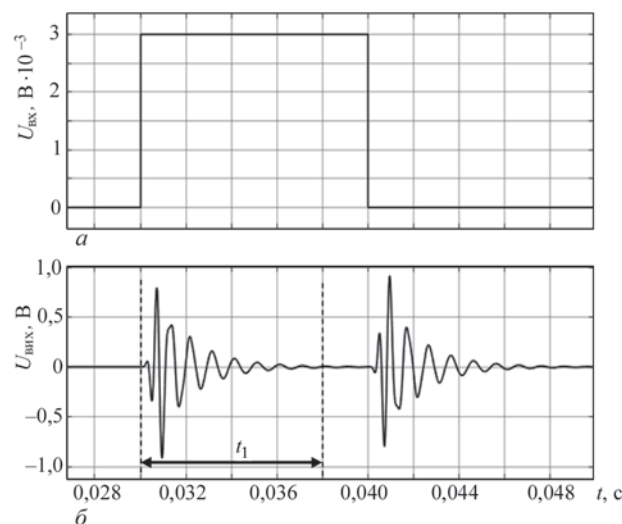


Рис. 7. Реакція моделі тракту на прямокутний імпульс. Опис а та б див. по тексту

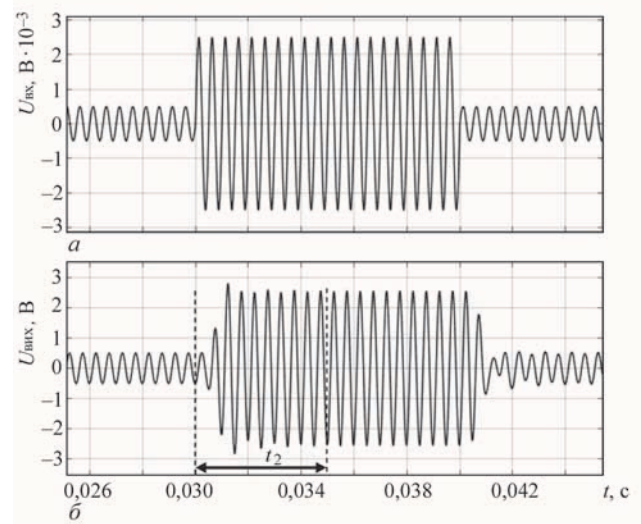


Рис. 8. Реакція моделі тракту на амплітудно-маніпульований сигнал прямокутної форми. Опис а та б див. по тексту

лу  $t_2$  відносно стрибка у вхідному амплітудно-модульованому сигналі складає близько 5 мс.

5.3. Дослідження відгуку схеми на сигнал з фазовою маніпуляцією. Значення девіації фази становило  $0,5\pi$ . На рис. 9 показано осцилограми сигналів в точках  $P_A$  (рис. 9, а),  $P_3$  (рис. 9, б) і  $P_K$  (рис. 9, в).

З рис. 9 видно, що сигналом модуляції є імпульс прямокутної форми тривалістю 10 мс. Цей імпульс подається на вхід фазового модулятора «PM modulator passband», вихід якого з'єднаний зі входом моделі аналогової схеми підсилювача сигналу вихрових струмів «Eddy current amplifier 3». Одночасно фазо-маніпульований сигнал подається на вхід безінерційного елемента «Gain 2», що має коефіцієнт підсилювання  $K_0$ . Виходи моделі «Eddy current amplifier 3» і безінерційного елемента «Gain 2» піддаються фазовій демодуляції елементами «PM demodulator 1», «PM demodulator 2» і далі поступають на вхід осцилоскопа «Scope 3». Така схема моделювання паралельного проходження фазо-маніпульованого сигналу дозволяє отримати значення параметра компенсації часової затримки  $t_4$  в елементах фазового модулятора-демодулятора. З урахуванням цієї компенсації час перехідного процесу для розглянутого сигналу у вхідному тракті дефектоскопу складає  $t_0 = t_3 - t_4 = 5,1$  мс. З рис. 9 також витікає, що вхідний тракт вихрострумowego дефектоскопу має початковий зсув фази  $\varphi_0 = -1,35$  рад, або  $-77,3^\circ$ . Реакція на стрибкоподібну зміну фази фазо-модульованого сигналу має характер перерегулювання величиною приблизно 13 %.

Розроблені імітаційна модель аналогової частини типового вимірювального тракту вихрострумowego дефектоскопу та методика аналізу перехідних процесів на цій моделі дають змогу

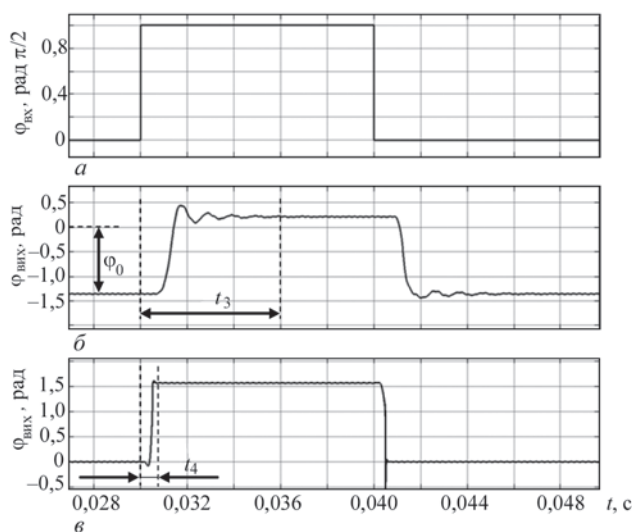


Рис. 9. Реакція моделі тракту на фазо-маніпульований сигнал ( $\varphi_{\text{вх}}$ ,  $\varphi_{\text{вих}}$  – відповідно вхідний і вихідний сигнали фазової маніпуляції). Опис а, б, в див. по тексту

досліджувати реакцію електронного тракту на сигнали ВСП в режимі сканування поверхні ОК і здійснювати коригування параметрів тракту з метою зменшення динамічних похибок вимірювання характеристик сигналів ВСП.

Реальні сигнали ВСП, які формуються під час сканування ОК з дефектом, уявляють сигнали з одночасно модульованими амплітудою і фазою, тому реальні відгуки електронного тракту вихрострумowego дефектоскопу можуть мати більш складний характер.

## Висновки

Під час сканування поверхні досліджуваного об'єкта вихрострумowym перетворювачем в автоматичному режимі локальні неоднорідності матеріалу об'єкта приводять до модуляції параметрів гармонічних сигналів збудження ВСП. Проходження таких сигналів у вимірювальних каналах дефектоскопа супроводжується виникненням перехідних процесів, здатних суттєво спотворити результати контролю.

З метою коректного вибору режимів сканування та формування результатів контролю необхідно виконувати дослідження стійкості роботи вимірювальних каналів таких дефектоскопів в різних режимах роботи. Розроблена імітаційна модель електричної схеми вхідного тракту вихрострумowego дефектоскопу та запропонована методика проведення досліджень на таких моделях дозволяють оцінювати параметри перехідних процесів в електронних трактах дефектоскопів.

За результатами імітаційного моделювання роботи вхідного тракту розробленого вихрострумowego дефектоскопа в перехідних режимах отримано: час затримки реакції на стрибок амплітуди сигналу складає близько 8 мс; реакція на стрибок амплітуди сигналу має коливальний загасаючий характер зі значною амплітудою першого максимуму; час встановлення вихідного сигналу за умови дії амплітудно-маніпульованого сигналу складає близько 5 мс; час встановлення вихідного сигналу за дії фазо-маніпульованого сигналу складає близько 5,1 мс.

Результати досліджень можуть бути використані для коригування алгоритмів автоматичного калібрування і опрацювання інформаційних сигналів в автоматизованих системах вихрострумowego контролю та вибору режимів сканування досліджуваних об'єктів.

## Список літератури

1. Ключев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др. (2005) *Неразрушающий контроль и диагностика*. Справочник. Москва, Машиностроение.
2. Satish S Udupa (technical editor), Patrick O'Moore (editor) (2004) *Nondestructive testing handbook, Third edition: 5, Electromagnetic testing*. ASNT.
3. Федосенко Ю. К. (2005) Становление, современное состояние и перспективы развития вихретокового контроля. *Контроль. Диагностика*, 5, 71–75.

4. Клюев В. В., Федосенко Ю. К., Мужичкий В. Ф. (2007) Вихретоковый контроль: современное состояние и перспективы развития. В мире неразрушающего контроля, 2, 4–9.
5. Luis F. S. G. Rosado. (2014) *New eddy current probes and digital processing algorithms for friction stir welding testing*. Lisbon, Lisbon University.
6. Сухоруков В. В., Вайнберг Е. И., Кажис Р.-Й. Ю. и др. (1993) Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 5. *Интроскопия и автоматизация неразрушающего контроля*. Практ. пособие. Москва, Высшая школа.
7. Учанін В. М. (2013) *Накладні вихроструміві перетворювачі подвійного диференціювання: монографія*. Львів, СПОЛОМ.
8. Юревич Е. И. (2005) *Основы робототехники*. Санкт-Петербург, БВХ-Петербург.
9. Долиненко В. В., Шаповалов С. В., Скуба Т. Г. та ін. (2017) Роботизована система неруйнівного вихрострумівого контролю виробів зі складною геометрією. *Автоматическая сварка*, 5-6(764), 60–67.
10. Луценко Г. Г., Учанин В. Н., Гоголя В. Н. (2005) *Автоматизированная многоканальная вихретоковая система для выявления и идентификации глубокозалегающих и поверхностных дефектов труб из неферромагнитных сталей*. Вип. 10: Электромагнитні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Львів, Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 108–111.
11. Сляднева Н. А. (2008) «РОБОСКОП ВТ-3000» Роботизированный комплекс вихретокового контроля. *Диагностические приборы. Средства и технологии неразрушающего контроля*, 1, 31.
12. Дьяконов В. П. (2013) *Simulink*. Самоучитель. Москва, ДМК-Пресс.
11. Slyadneva, N.A. (2008) *ROBOSCOPE VT-3000. Robotic complex for eddy-current testing. Diagnostic instruments. Средства и Технологии Неразрушающего Контроля*, 1, 31 [in Russian].
12. Dyakonov, V.P. (2013) *Simulink: Teach-yourself manual*. Moscow. DMK-Press [in Russian].

#### References

1. Klyuev, V.V., Sosnin, F.R., Kovalev, A.V. et al. (2005) *Non-destructive testing and diagnostics: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. (2004) *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd Ed. Vol. 5: Electromagnetic testing. ASNT. Ed. by Techn. ed. Satish, S. Udupa. Ed. by P. O'Moore.
3. Fedosenko, Yu.K. (2005) Emergence current state and prospects for development of eddy-current testing. *Kontrol. Diagnostika*, 5, 71-75 [in Russian].
4. Klyuev, V.V., Fedosenko, Yu.K., Muzhitsky, V.F. (2007) Eddy-current testing: Current state and prospects of development. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, 2, 4-9 [in Russian].
5. Luis F.S. G. Rosado (2014) *New eddy current probes and digital processing algorithms for friction stir welding testing*. Lisbon, Lisbon University.
6. Sukhorukov, V.V., Vajnberg, E.I., Kazhis, R.J.Yu. et al. (1993) Non-destructive testing. In: 5 books. Book 5: *Intros-copy and automation of non-destructive testing*: Pract. Manual. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
7. Uchanin, V.M. (2013) *Double differentiation put-on eddy-current transducers: Monography*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
8. Yurevich, E.I. (2005) *Fundamentals of robotic engineering*. St.-Petersburg, BVKh-Peterburg [in Russian].
9. Dolinenko, V.V., Shapovalov, E.V., Skuba, T.G. et al. (2017) Robotic system of non-destructive eddy-current testing of complex geometry products. *The Paton Welding J.*, 5/6, 51-57.
10. Lutsenko, G.G., Uchanin, V.N., Gogulya, V.N. (2005) *Automated multichannel eddy-current system for detection and identification of in-depth and surface defects of pipes from nonferromagnetic steels. Issue 10: Electromagnetic and acoustic methods of nondestructive testing of materials and products. Series: Physical methods and means of control of media, materials and products*. Lviv, PMI, 108-111 [in Ukrainian].

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ВИХРЕТОКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА

В. В. ДОЛИНЕНКО<sup>1</sup>, Е. В. ШАПОВАЛОВ<sup>1</sup>, Ю. В. КУЦ<sup>2</sup>,  
М. А. РЕДЬКА<sup>2</sup>, В. Н. УЧАНИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТУУ «КПИ им. Игрия Сикорского». 03056, г. Киев, пр. Победы, 37.

<sup>3</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.  
E-mail: vuchanin@gmail.com

Разработана имитационная модель аналоговой части измерительного тракта дефектоскопа, предназначенного для использования в автоматизированных системах вихретокового контроля, а также виртуальный стенд и методика для ее испытаний. На разработанной модели выполнены исследования переходных процессов в аналоговом тракте дефектоскопа для различных типов входных вихретоковых преобразователей. Результаты исследований могут быть использованы для корректировки алгоритмов автоматической калибровки и обработки информационных сигналов и принятия решений в автоматизированных системах вихретокового контроля. Библиогр. 12, рис. 9.

Ключевые слова: автоматический вихретоковый дефектоскоп, вихретоковый сигнал, имитационная модель, амплитудная и фазовая модуляция, переходной процесс

#### MODELING THE TRANSIENT PROCESSES IN MEASUREMENT CHANNEL OF EDDY-CURRENT FLAW DETECTOR

V.V. DOLINENKO<sup>1</sup>, E.V. SHAPOVALOV<sup>1</sup>, Yu.V. KUTS<sup>2</sup>,  
M.A. REDKA<sup>2</sup>, V.N. UCHANIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorskii KPI», 37 Peremogi Prosp., 03056 Kyiv

<sup>3</sup>G.V.Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5 Naukova Str., Lviv, E-mail: vuchanin@gmail.com

Simulation model of analog part of measurement path of a flaw detector designed for application in automated systems of eddy current testing, as well as virtual stand and procedure for its testing were developed. The developed model was used for studying the transient processes in the flaw detector analog path for different types of input eddy current transducers. Investigation results can be applied for correction of the algorithms for automatic calibration and processing the information signals and taking decisions in automated systems of eddy current testing. 12 Ref., 9 Fig.

Keywords: automatic eddy current flaw detector, eddy current signal, simulation model, amplitude and phase modulation, transient process

Надійшла до редакції  
15.11.2018



## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. НЕДОСЕКА<sup>1</sup>, А. Я. НЕДОСЕКА<sup>1</sup>, М. А. ШЕВЦОВА<sup>2</sup>, А. Н. ГУРЬЯНОВ<sup>1</sup>, А. А. ВАМБОЛЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». 61070, г. Харьков, ул. Чкалова 17. E-mail: [khai@khai.edu](mailto:khai@khai.edu)

Композиционные материалы, в том числе и на основе нитей углерода, обеспечивающие вместе с необходимой прочностью достаточно большую экономию в весе создаваемой конструкции любой формы и позволяющие реализовать уникальные характеристики при их использовании, находят все более широкое применение при создании конструкций и требуют разработки надежного неразрушающего метода оценки их состояния, в том числе в процессе эксплуатации. В данной работе выполнена оценка возможности применения метода АЭ на базе аппаратуры типа ЕМА для контроля композиционного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564. Выполнена проверка локаций координат источников АЭ на ненагруженной пластине и образцах, подвергнутых статическому нагружению. Проверена возможность выделения различных стадий нагружения по сигналам АЭ. Показано, что исследуемый композиционный материал является контролепригодным с точки зрения метода АЭ, позволяет определять координаты источников АЭ с достаточно высокой точностью при тестовом прозвучивании и излучает волны АЭ в процессе деформирования и разрушения. При наличии концентраторов можно с достаточной для практики точностью определить их местоположение в процессе нагружения образца. При проведенных АЭ испытаниях образцов на растяжение выделено две разделенные во времени группы событий, первая из которых возникает вскоре после начала нагружения, а вторая непосредственно перед разрушением и в процессе его. Отмечено резкое двукратное повышение уровня непрерывной АЭ при регистрации предразрушающего состояния и момента разрушения. Отмечена принципиальная возможность создания методики контроля композитов с применением АЭ технологии и прогнозированием их состояния после дополнительных исследований с целью четкой отработки критериев, характеризующих разрушение. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, композиционные материалы, стадия нагружения, деформирование, локация координат, предразрушающее состояние, контроль

В последнее время в конструкциях машиностроения все шире применяются композиционные материалы, в том числе и на основе нитей углерода, обеспечивающие вместе с необходимой прочностью достаточно большую экономию в весе создаваемой конструкции любой формы и позволяющие реализовать уникальные характеристики за счет их применения. Поэтому исследование прочности этих материалов, их контроль на всех стадиях создания, контроль состояния готовой конструкции в процессе эксплуатации является важной задачей. В этом случае большое значение может иметь технология оценки состояния материала на основе акустической эмиссии (АЭ технология [1, 2]), показавшая удовлетворительные результаты при оценке состояния конструкций, созданных на основе обычных однородных материалов. Такое применение АЭ является обычной практикой уже в течение многих лет [2–4]. Однако, учитывая неоднородность свойств композиционных материалов по направлениям приложенной нагрузки, необходимы исследования, которые позволят определить место АЭ технологии в практике контроля конструкций из композитов.

Принципиальным ответом на этот вопрос будут результаты исследований, в том числе механи-

ческих испытаний этих материалов, с применением АЭ аппаратуры. В данной работе рассмотрено применение для этих целей аппаратуры на основе последних достижений в области АЭ технологии.

В рамках международного проекта Aero-UA Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины была проведена серия АЭ испытаний образцов из композитного материала Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564 (механические свойства приведены в таблице), изготовленных Национальным аэрокосмическим университетом им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Первоначальная цель исследования заключалась в определении принципиальной тестируемости этого композиционного материала с использованием датчиков, оборудования и АЭ технологий, реализованных с использованием приборов ЕМА-4 [5] (рис. 1). Отметим в качестве дополнительной информации, что положительные результаты при исследовании технических возможностей метода АЭ для контроля углепластиков, используемых в аэрокосмической технике, уже получали другие исследователи, причем достаточно давно [6], и до сегодняшнего дня эти работы продолжаются [7], что говорит об их актуально-

Т а б л и ц а . Механические свойства углепластика Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564

Характеристика	Значение	Коэффициент вариации, %
Модуль упругости при растяжении в направлении основы ткани $E_{1p}$ , ГПа	161,48	8,59
Предел прочности при растяжении в направлении основы ткани $F_{1p}$ , МПа	1811,3	7,14
Модуль упругости на сжатие в направлении основы ткани $E_{1c}$ , ГПа	121,84	6,88
Предел прочности при сжатии в направлении основы ткани $F_{1c}$ , МПа	458,3	21,14
Коэффициент Пуассона $\mu_{12}$ при растяжении	0,26	13,96
Коэффициент Пуассона $\mu_{12}$ при сжатии	0,3	8,22
Модуль упругости в направлении утка ткани $E_{22}$ , ГПа	9,9	9,87
Предел прочности при растяжении в направлении утка ткани $F_{2p}$ , МПа	11,6	28,64
Коэффициент Пуассона $\mu_{21}$	0,064	35,6
Разрушающее напряжение $\sigma_{\pm 45^\circ}$ , МПа	162,0	12,93
Модуль сдвига $G_{12}$ , ГПа	4,317	4,93
Напряжение $F_{12}$ , МПа кгс/мм <sup>2</sup>	35,5	7,67
Разрушающее напряжение $\sigma_{\pm 45^\circ}$ при сжатии образца ( $\pm 45^\circ$ ), МПа	143,0	8,04
Модуль упругости при сжатии образца ( $\pm 45^\circ$ ), ГПа	17,88	27,62

сти. В данной работе проведена оценка возможности применения приборов ЕМА, разработанных Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, для обнаружения повреждений и контроля состояния композитных конструкций на основе углепластика.

Предоставленный образец углепластика представлял собой тонкую пластину размером 310×260×2,1 мм.

Исследования на акустическую проводимость материала и точность локации координат источников АЭ сигналов на плоскости проводили с использованием четырех датчиков ДАЭ-01, каждый из которых поочередно использовался в качестве генератора акустических волн. Датчики размещали на небольшом расстоянии от края образца, так что образовали локационную антенну размером 230×200 мм. После проверки акустической проводимости первоначальная пластина была разрезана на полосы 310×30 мм, которые использовали в качестве образцов для испытаний на разрыв. Часть образцов была ослаблена круговыми концентраторами (рис. 2) с целью установления возможности их локации методом АЭ в процессе нагружения.

Первые же опыты показали, что исследуемый материал обладает высокой акустической чувствительностью, сравнимой с таковой у многих металлов. Прохождение АЭ волн через материал

было нормальным. Возможность определения координат сигналов была обеспечена с достаточной точностью. Кроме того, было выполнено ручное простукивание образца тонким металлическим стержнем в разных направлениях, при этом координаты также определялись хорошо.

При определении местоположения источников АЭ с использованием датчиков в качестве генератора волн скорости волн АЭ в материале подбирались таким образом, чтобы расчетные координаты сигналов АЭ, излученных датчиками, а затем принятых АЭ прибором, максимально точно совпали с координатами датчика-излучателя. Здесь сразу сказался эффект анизотропии исследуемого материала.

Если при прозвучивании металлов скорости в продольном и поперечном направлениях обычно практически не отличаются и составляют от 3 до 5 мм/мкс, то для материала Udo UD CST эти скорости отличаются почти в два раза. Добиться картины, приведенной на рис. 3, удалось, задав скорости 8 мм/мкс в направлении  $X$ , соответствующем короткой стороне пластины, и 4 мм/мкс в



Рис. 1. Приборы ЕМА-4 (Evaluation of Materials Ability) в 4-х и 16-ти канальном варианте

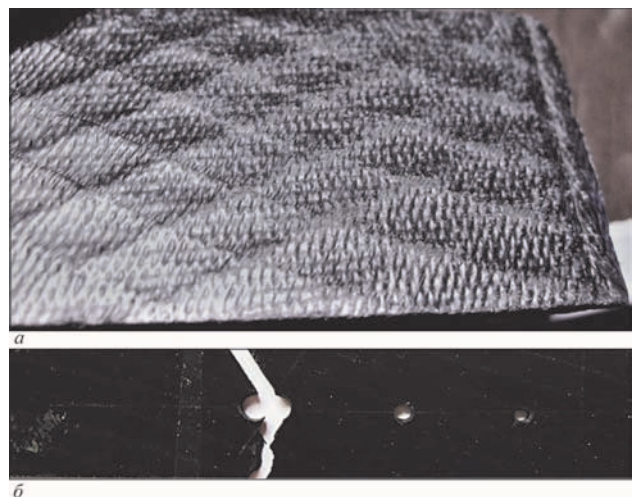


Рис. 2. Образец с хорошо видимой армированной структурой материала (а) и образец с круговыми концентраторами после разрыва (б)

направлении  $Y$ , соответствующем длинной стороне. Отметим, что в программе ЕМА-3.9 [8], которая использовалась при испытаниях, центры акустической активности, объединенные в кластеры, показаны флажками, цвет которых отображает амплитуду последнего вошедшего в кластер события АЭ, а число рядом с флажком показывает, сколько событий АЭ попало в кластер.

Результаты определения скоростей волн АЭ подтверждаются и ручным простукиванием пластины в отдельных точках, расположенных по диагонали (рис. 4). Как видим, координаты мест ударов по пластине хорошо ложатся на условную диагональ.

Представленные опыты неоднократно повторяли. Результаты их обработки показали, что, во-первых, данный материал является контролепригодным с точки зрения АЭ и, во-вторых, обеспечивает необходимую точность определения координат источников АЭ.

Определение скоростей волн АЭ в материале является необходимым этапом перед его механическими испытаниями, поскольку при их проведении требуется определять координаты возникших источников АЭ излучения и определять их характер и степень влияния на общее состояние материала.

Дальнейшие испытания материала проводили путем растяжения образцов размером  $310 \times 30$  мм в разрывной машине с жесткими условиями нагружения. Для исследований применялась аппаратура ЕМА-3. Для локации координат источников АЭ использовали 2 датчика, расстояние между которыми в разных экспериментах варьировали.

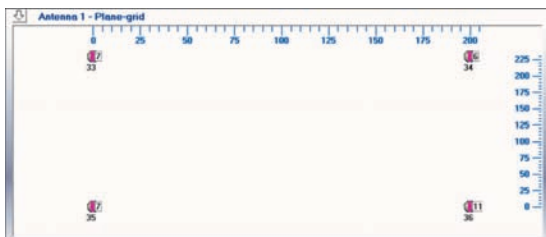


Рис. 3. Результаты прозвучивания пластины встроенным в датчики генератором акустических сигналов. Высокая точность определения координат видна на рисунке (центры акустической активности показаны флажками и совпадают с местами расположения датчиков АЭ)

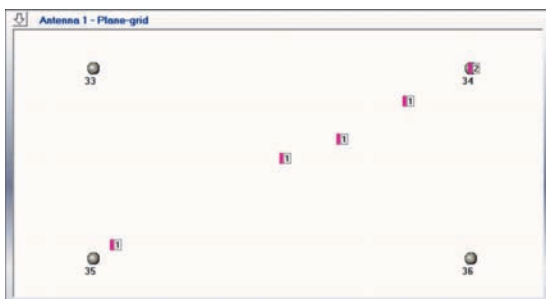


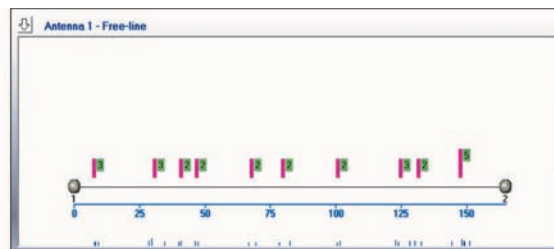
Рис. 4. Результаты прозвучивания пластины путем ручного простукивания металлическим стержнем. Центры акустической активности показаны флажками и совпадают с местами ударов по пластине

Первые испытания проводили на образцах без концентраторов и показали, что в процессе нагружения акустическая эмиссия возникает в различных точках по длине образца и распределена достаточно равномерно (рис. 5, а).

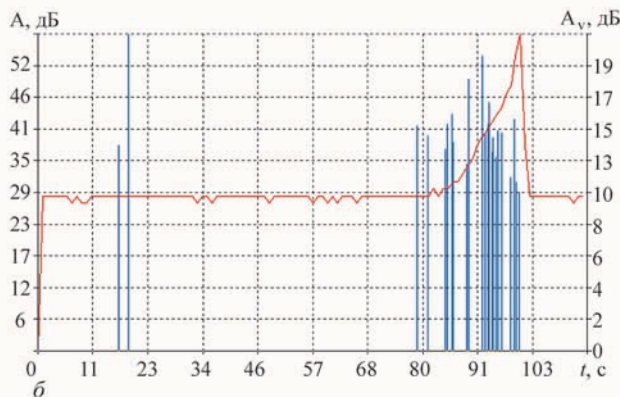
В то же время появление событий АЭ не является равномерным во времени и можно четко выделить две группы таких событий – одну в начале нагружения, вторую непосредственно перед разрушением. Отметим также, что перед разрушением происходит резкий подъем уровня непрерывной АЭ в 2 раза (рис. 5, б).

Испытания образца с концентраторами представляют значительный интерес, поскольку их фиксация методом АЭ на образце может служить основой для определения местоположения концентраторов в реальных конструкциях. Схема образца с круговыми концентраторами диаметром 5, 3 и 2 мм, соответственно, приведена на рис. 6.

В случае нагружения образца с концентратором картина несколько отличается от представленной на рис. 5. События АЭ образуют более крупные кластеры, что говорит о присутствии в материале очагов концентрации, в которых разруше-



а



б

Рис. 5. Результаты испытания образца с концентраторами: а – распределение АЭ по длине образца; б – амплитуда АЭ (А, столбчатый график) и непрерывная АЭ (Av, линейный график) в зависимости от времени

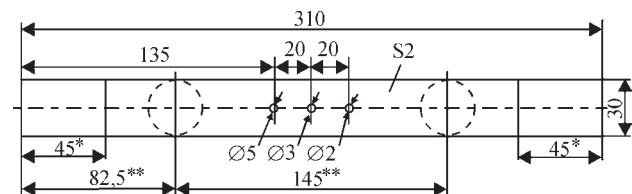


Рис. 6. Схема образца с концентраторами. (\* – расстояния до датчиков и между датчиками; \*\* – расстояния от захватов разрывной машины)



ние развивается наиболее интенсивно. Несмотря на малые отверстия в образце, полученные путем сверления, зона развития разрушения вблизи каждого из них превышает размеры самих отверстий.

Из представленных на рис. 7, а кластеров, образованных путем обработки событий АЭ, три средних соответствуют местам расположения концентраторов с достаточно высокой точностью.

АЭ показывает центр кластера в точке 47 мм, в то время как центр отверстия концентратора отстоит от датчика АЭ на 52,5 мм. Второй кластер имеет центр 78 мм при центре соответствующего отверстия 72,5 мм. Третий – 102 и 92,5 мм, соответственно. Для первых двух кластеров разница в определении координат источника АЭ, т. е. концентратора, составляет 5,5 мм при том, что рекомендуемая погрешность измерений не должна превышать 5 % от расстояния между близлежащими датчиками АЭ, в данном случае это 7,5 мм. Немного большая погрешность для третьего кластера хорошо объяснима тем, что соответствующий ему концентратор напряжений имеет наименьший диаметр, и, соответственно, зона формирования разрушения вблизи этого концентратора имеет меньшие размеры, чем вблизи остальных. Разрушение образца произошло по отверстию концентратора с наибольшим диаметром. Причиной этого, помимо более широкого поля влияния концентратора напряжений вблизи отверстия, также послужило и максимальное исключение материала в процессе сверления, что дало наименьшую площадь сечения образца для восприятия нагрузки.

Из этого можно сделать дополнительный вывод о том, что наиболее важным представляется более

четкое, чем в материале без концентратора, появление плотной группы событий АЭ на начальной стадии нагружения. Это говорит о возможности раннего обнаружения проблем с нарушением прочности и целостности данного материала.

Появление, как и в случае образца без концентратора, двукратного скачка непрерывной АЭ перед разрушением также свидетельствует о применимости метода АЭ для своевременного обнаружения процесса трещинообразования. Полученные результаты говорят о принципиальной возможности создания методики применения метода АЭ на практике при контроле композитных материалов подобного типа. Для этого требуются дальнейшие исследования в этом направлении и получение набора статистических данных, которые позволили бы установить необходимые критерии безопасности эксплуатации конструкций из композиционных материалов при их мониторинге методом АЭ.

### Выводы

1. Исследования показали, что композиционный материал Udo UD CST 150/300 на основе связующего ARALDITE 564 является контролепригодным с точки зрения метода АЭ, позволяет определять координаты источников АЭ с достаточно высокой точностью при тестовом прозвучивании и излучает волны АЭ в процессе деформирования и разрушения.

2. АЭ при проведенных испытаниях образцов образует две разделенные во времени группы событий. Первая возникает вскоре после начала нагружения. Вторая регистрируется непосредственно перед разрушением и в процессе его, вплоть до полного разделения образца на части.

3. При наличии концентраторов метод АЭ позволяет с достаточной для практики точностью определить их местоположение в процессе нагружения образца.

4. Важным для регистрации предразрушающего состояния и момента разрушения в проведенных экспериментах представляется резкое двукратное повышение уровня непрерывной АЭ.

5. Создание методики контроля композитов с применением АЭ технологии и построения алгоритма прогнозирования разрушения материала на основе приборов серии ЕМА возможно, но требует дополнительных исследований с целью четкой отработки критериев, характеризующих разрушение.

### Список литературы

1. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред.). Киев, Индпром.
2. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2012) Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 7–22.
3. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мони-

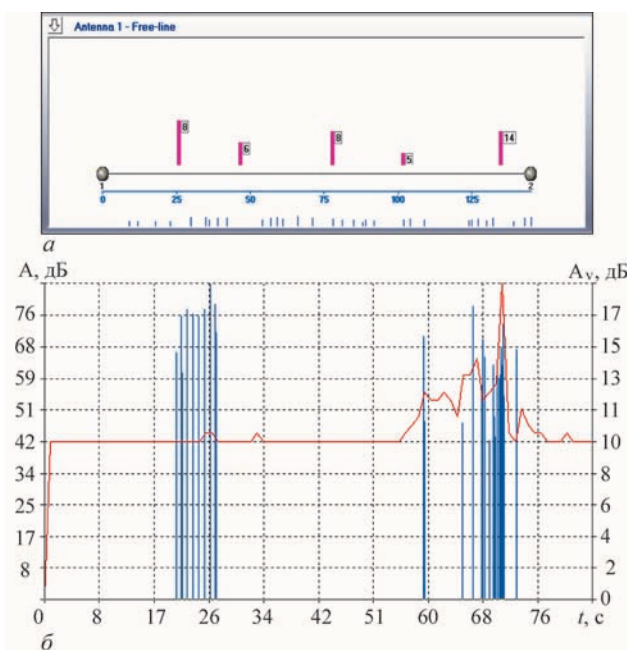


Рис. 7. Результаты испытания образца без концентраторов: а – распределение АЭ по длине образца; б – амплитуда АЭ (А, столбчатый график) и непрерывная АЭ (Av, линейный график) в зависимости от времени

- торинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. Там же, 3, 7–14.
4. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). Там же, 2, 3–18.
  5. Недосека А. Я., Недосека С. А., Грузд А. А. и др. (2010) Приборы для акустико-эмиссионного контроля и диагностирования сварных конструкций. Автоматическая сварка, 8, 58–61.
  6. Zimcik D. G., Proulx D., Roy C., Maslouhi A. (1987) Real-Time monitoring of carbon-epoxy composites using acoustic emission NDE. In: Proc. of 19th Int. SAMPE Tech. Conf., Crystal City, VA, Oct. 13–15, 1987, Vol. 19. Covina, Calif., pp. 360–370.
  7. Esola, S., Wisner, B. J., Vanniamparambil, P. A. et al. (2018) Qualification Methodology for Composite Aircraft Components Using Acoustic Emission Monitoring. Appl. Sci., 8, 1490. <https://doi.org/10.3390/app8091490>.
  8. 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.

## References

1. Nedoseka, A.Ya. (2008) Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Indprom.
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. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. Ibid., 3, 7–14 [in Russian].
4. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies and new generation control equipment on its basis. Ibid., 2, 3–18 [in Russian].
5. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Gruzd, A.A. et al. (2010) Instruments for acoustic emission control and diagnostics of welded structures. The Paton Welding J., 8, 50–53.
6. Zimcik D. G., Proulx D., Roy C., Maslouhi A. (1987) Real-Time monitoring of carbon-epoxy composites using acoustic emission NDE. In: Proc. of 19th Int. SAMPE Tech. Conf., Crystal City, VA, Oct. 13–15, 1987, Vol. 19. Covina, Calif., pp. 360–370.
7. Esola, S., Wisner, B.J., Vanniamparambil, P.A. et al. (2018) Qualification methodology for composite aircraft components using acoustic emission monitoring. Appl. Sci., 8, 1490. <https://doi.org/10.3390/app8091490>.
8. 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].

## АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ ВИПРОБУВАННІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

С. А. НЕДОСЕКА<sup>1</sup>, А. Я. НЕДОСЕКА<sup>1</sup>, М. А. ШЕВЦОВА<sup>2</sup>,  
О. М. ГУРЬЯНОВ<sup>1</sup>, О. О. ВАМБОЛЬ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 61070, м. Харків, вул. Чкалова 17. E-mail: khai@khai.edu

Композиційні матеріали, в тому числі і на основі ниток вуглецю, що забезпечують разом з необхідною міцністю чималу економію у вазі створюваної конструкції будь-якої форми і дозволяють реалізувати унікальні характеристики при їх використанні, знаходять все більш широке застосування при створенні конструкцій і вимагають розробки надійного неруйнівного методу оцінки їх стану, в тому числі в процесі експлуатації. У даній роботі виконана оцінка можливості застосування методу АЕ на базі апаратури типу ЕМА для контролю композиційного матеріалу Udo UD

CST 150/300 на основі зв'язуючого ARALDITE 564. Виконано перевірку локації координат джерел АЕ на ненавантажений пластині і зразках, підданих статичному навантаженню. Перевірена можливість виділення різних стадій навантаження за сигналами АЕ. Показано, що досліджуваний композиційний матеріал є контролепридатним з точки зору методу АЕ, дозволяє визначати координати джерел АЕ з досить високою точністю при тестовому прозвучуванні і випромінює хвилі АЕ в процесі деформування і руйнування. При наявності концентраторів можна з достатньою для практики точністю визначити їх місце розташування в процесі навантаження зразка. При проведених АЕ випробуваннях зразків на розтяг виділено дві розділені у часі групи подій, перша з яких виникає незабаром після початку навантаження, а друга безпосередньо перед руйнуванням і в процесі його. Відзначено різке дворазове підвищення рівня безперервної АЕ при реєстрації передруйнівного стану і моменту руйнування. Відзначено принципову можливість створення методики контролю композитів із застосуванням АЕ технології і прогнозуванням їх стану після додаткових досліджень з метою чіткого відпрацювання критеріїв, що характеризують руйнування. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: акустична емісія, композитні матеріали, стадія навантаження, деформування, локація координат, передруйнівний стан, контроль

ACOUSTIC EMISSION AT COMPOSITE MATERIAL TESTING  
S.A. NEDOSEKA<sup>1</sup>, A.Ya. NEDOSEKA<sup>1</sup>, M.A. SHEVTSOVA<sup>2</sup>,  
A.N. GURYANOV<sup>1</sup>, A.A. VAMBOL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS Ukraine,  
11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>N.E.Zhukovski National Aerospace University «Kharkiv  
Aviation Institute», Chkalov str., 61070, Kharkiv.

E-mail: khai@khai.edu

Composite materials, including those based on carbon filaments, ensuring a rather great reduction of the weight of the developed structure of any shape, alongside the required strength, and allowing realization of unique characteristics at their application, are becoming ever wider applied at creation of structures and require development of a reliable nondestructive method for evaluation of their state, in particular, in service. Possibility of application of AE method based on EMA type instrumentation to control composite material Udo UD CST 150/300 with ARALDITE binder 564 was assessed in this work. Verification of the location of AE source coordinates was performed on an unloaded plate and on samples under static loading. Possibility of separation of different loading stages by AE signals was checked. It is shown that the studied composite material is testable from the viewpoint of AE method, allows determination of AE source coordinates with sufficiently high accuracy at test sounding and emits AE waves during deformation and fracture. In the presence of concentrators it is possible to determine their location during sample loading, with sufficient degree of accuracy for practical purposes. During the conducted AE testing of samples for tensile testing, two groups of events separated in time were singled out. The first of them appears soon after the start of loading, and the second one – directly before fracture and during it. An abrupt two times increase of the continuous AE level was noted at recording of the pre-fracture state and the moment of fracture. A fundamental possibility of development of the composites control procedure with AE technology application and prediction of their state after additional studies with the purpose of precise determination of the criteria, characterizing fracture, is noted. 8 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: acoustic emission, composite materials, loading stage, deformation, coordinate location, prefracture state, control

Поступила в редакцію 27.11.2018

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОТОРА И ВКЛАДЫША

В. Н. ДОЦЕНКО<sup>1</sup>, Н. И. НАВАЛЬНЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17. E-mail: khai@khai.edu

<sup>2</sup>Харьковский территориальный центр филиала НПП «Техдиагаз». 61002, г. Харьков, ул. Маршала Конева, 16. E-mail: shkorina-enbung@i.ua

В статье рассмотрена возможность получения дополнительной информации о состоянии подшипника скольжения при проведении вибрационного обследования. Предлагается использовать как источник информации колебания контактной площадки подшипника скольжения. Библиогр. 3, рис. 4.

*Ключевые слова:* виброакустические измерения, ротор, подшипник скольжения, частота свободных колебаний, контактное взаимодействие

Практика эксплуатации и научная литература, например работа [1], показывают, что подшипники скольжения обладают слабой виброакустической активностью, когда диагностический сигнал очень трудно выделить из шума. С другой стороны процесс разрушения антифрикционных покрытий, в частности баббита Б83, носит быстротекущий характер. Поэтому диагностика работоспособности подшипника скольжения, в конечном счете, сводится к контролю состояния рабочих зазоров между ротором и вкладышами подшипника в процессе эксплуатации оборудования.

Следует отметить, что заедание – это аварийный дефект, и он приводит к аварийному останову агрегата вследствие заклинивания ротора.

В условиях эксплуатации предусмотрен контроль вертикального, горизонтального и осевого смещения ротора. На рис. 1 представлено типичное индукционное смещение ротора.

Осовой сдвиг ротора регламентируется технической документацией до величины 380 мкм, не более. На практике величины вертикального и горизонтального смещений устанавливают в зависимости от типа конструкции оборудования. Фактическая величина смещений в основном находится в пределах 16...38 мкм. Фактическая величина осевого смещения ротора 50...60 мкм.

На практике [2] отмечалось, что виброакустическая диагностика определяет техническое состояние подшипников как удовлетворительное, но уже параллельно, как показывает рентгенофлуоресцентный анализ смазывающей жидкости [3], идет износ, и даже можно сказать значительный. Это означает, что ротор уже работает в подшипнике в режиме полужидкостного трения.

На основе опыта диагностирования однозначно определено, что заедание приводит к появлению чередующихся сигналов, частота появления которых резко возрастает, а перед наступлением полного заедания уменьшается. Неустойчивые колебания ротора определяются появлением в спектре частот 0,42...0,48 от частоты вращения ротора  $f_p$  [2].

В данной работе мы хотим показать, что можно определять работоспособность подшипника скольжения используя методы и наработки теории контактного взаимодействия. Эти предположения будут сделаны только под углом технической диагностики и будут носить, в основном, оценочный характер.

На рис. 2 приведено состояние рабочих поверхностей вкладыша подшипника скольжения. Нарботка 4000 ч.

На наш взгляд в технической литературе вообще представлено мало работ по влиянию контактного взаимодействия ротора и вкладыша подшип-

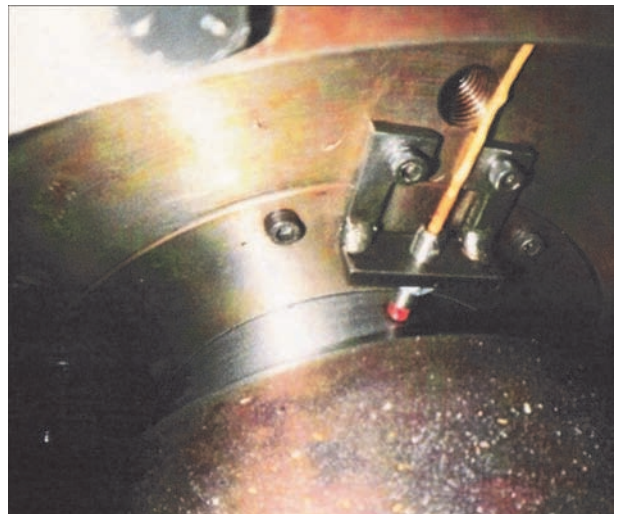


Рис. 1. Расположение индукционного датчика смещений ротора



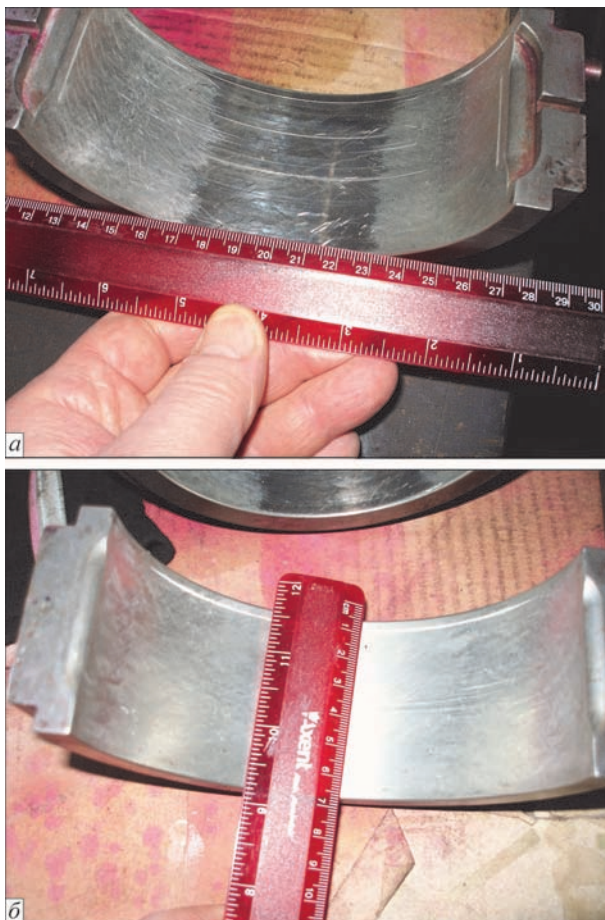


Рис. 2. Измерение геометрических размеров вкладыша подшипника

ника при гидродинамической смазке на запуске и останове. Также отсутствуют признаки работоспособности подшипников скольжения исходя из контактного взаимодействия ротора и вкладыша.

Покажем на примере, что происходило в подшипниках скольжения во время эксплуатации оборудования.

Приведем данные по материалам подшипника и его геометрическим характеристикам. Материал ротора – легированная сталь с модулем Юнга  $2,1 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup> и коэффициентом Пуассона – 0,3.

Материал вкладыша – баббит Б83 с модулем Юнга  $0,55 \cdot 10^6$  кгс /см<sup>2</sup> и коэффициентом Пуассона – 0,305.

Диаметр ротора – 152 мм. Диаметр вкладыша – 152,2 мм. Длина рабочей поверхности вкладыша 60 мм. Вес ротора 600 кг.

В конструкции агрегата предусмотрен опорно-упорный подшипник и опорный подшипник.

Из работы [4] находим ширину прямоугольной площадки контакта:

$$b = 2,15 \sqrt{\frac{q}{2L} \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}}, \quad (1)$$

где  $R_1, R_2$  – радиусы шейки вала и вкладыша подшипника скольжения, см;  $E_1, E_2$  – модули Юнга стали и баббита Б83.

$$b = 2,15 \sqrt{\frac{600}{2 \cdot 6,0} \cdot \frac{\frac{1}{2,1 \cdot 10^6} + \frac{1}{0,55 \cdot 10^6}}{\frac{1}{7,6} - \frac{1}{7,61}}} = 1,63 \text{ см.}$$

Из работы [5] находим частоту колебаний прямоугольной пластины размером  $L \times b \times \delta = 6 \times 1,63 \times 0,044$  см (рис. 3). Величина деформации  $\delta$  равна 0,044 см. Эта величина найдена из геометрических соотношений размеров вала и вкладыша подшипника:

$$\begin{aligned} \delta &= R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \\ &= 7,61 - \sqrt{7,61^2 - \left(\frac{1,63}{2}\right)^2} = 0,044 \text{ см.} \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 3 представлена схема расположения прямоугольной контактной площадки.

Частоту свободных колебаний пластины вычислим по формуле:

$$f = 0,159 \frac{k^2}{b^2} \sqrt{\frac{D}{\rho \delta}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент закрепления контура. Для случая, когда пластина жестко закреплена двумя противоположными сторонами и не опирается двумя другими:

$$k^2 = \pi^2 \sqrt{1,506^4 + 2,496 \frac{12}{\pi^2} (1 - \gamma) \frac{b^2}{a^2}}, \quad (4)$$

$D = \frac{E \delta^3}{12(1 - \gamma^2)}$ , цилиндрическая жесткость пластины, кг·см;  $\rho$  – плотность баббита Б83 – 0,00738 кг/см<sup>3</sup>;  $\delta$  – толщина пластины (толщина деформированного слоя), см;  $\gamma$  – коэффициент Пуассона для баббита Б83, равный 0,305.

Тогда:

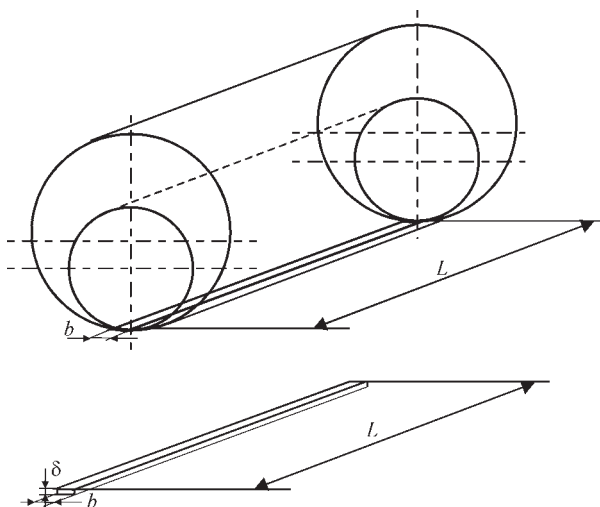


Рис. 3. Расположение контактной площадки в узле подшипника скольжения



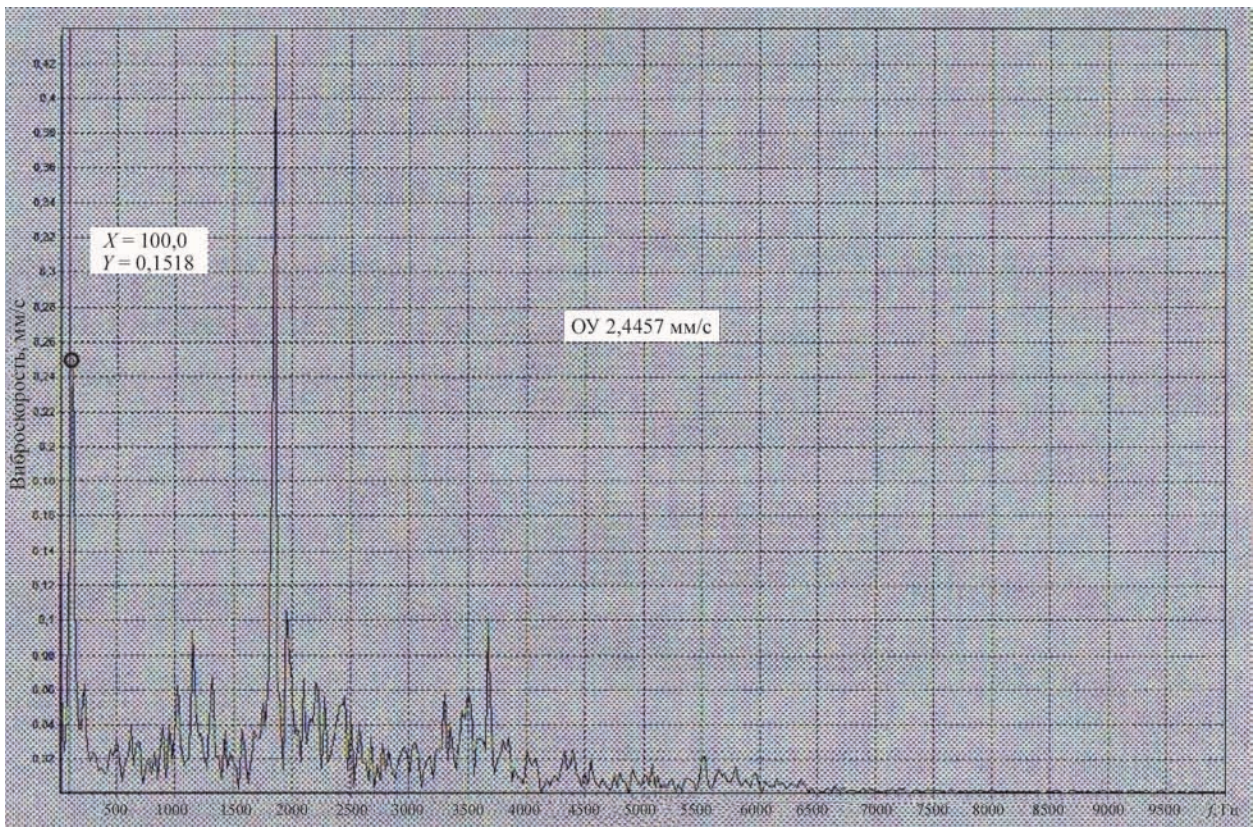


Рис. 4. Виброграмма подшипника скольжения. Вертикальная составляющая виброскорости

$$D = \frac{0,55 \cdot 10^6 \cdot 0,044^3}{12(1 - 0,305^2)} = \frac{0,55 \cdot 10^6 \cdot 0,0008}{12(1 - 0,305^2)} = 4,03 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

$$k^2 = 3,14^2 \sqrt{1,506^4 + 2,496 \frac{12}{3,14^2} (1 - 0,305) \frac{1,63^2}{6^2}} = 22,7.$$

Тогда  $f$ :

$$f = 0,159 \frac{22,7}{1,63^2} \sqrt{\frac{4,03}{0,00738 \cdot 0,044}} = 156,3 \text{ Гц}$$

Сравним рассчитанную частоту с полученными замерами виброакустического обследования (рис. 4). Видим, что на виброграмме имеется данная частота 156 Гц с уровнем 0,25 мм/с. При этом первая оборотная частота равна 100 Гц с уровнем 0,518

### Выводы

1. Собственная частота колебания площадки контакта является важнейшим источником информации о процессах, протекающих в подшипнике скольжения.

2. В силу того, что отклонения различных параметров вызывают изменения геометрии контактной площадки, это приводит к повышенному износу и, как следствие, появлению в спектре более высоких частот.

Следует отметить, что на частоте 156,3 Гц амплитуда виброскорости равна 0,25 мм/с и тогда отсюда вытекает величина вибросмещения, рав-

ная 0,25 мкм, что сопоставимо с реальными величинами износа.

3. При исчезновении масляного клина, когда ротор начинает взаимодействовать с вкладышем подшипника, появление частот свободных колебаний (либо кратных ей) площадки контакта, будет свидетельствовать о характере работы всего подшипникового узла.

4. Считаем, что данное направление следует развивать и результаты внедрять в практику диагностических обследований подшипников скольжения.

Такой подход к выполнению вибрационной диагностики послужит дополнительной основой для осуществления комплексной диагностики энергомеханического оборудования [6].

### Список литературы

1. Генкин М. Д., Соколова А. Г. (1987) *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. Москва, Машиностроение.
2. Русов В. А. (1996) *Спектральная вибродиагностика*. Пермь, Виброцентр.
3. Навальнев Н. И., Ковтун В. Е. (2011) *Использование метода рентгенофлуоресцентного анализа при трибодиагностике газоперекачивающих агрегатов*. Москва, Газовая промышленность, Приложение.
4. (1979) *Сопротивление материалов*. Учебник для вузов. Г. С. Писаренко (ред.). Киев, Вища школа.
5. Вайнберг Д. В. (1973) *Справочник по прочности, устойчивости и колебаниям пластин*. Киев, Будивельник.
6. Кудря В. Д., Навальнев Н. И. (2017) *Комплексная диагностика энергомеханического оборудования и ее информационно-контрольное обеспечение. Идея и механизм реализации*. Харьков, Факт.

## References

1. Genkin, M.D., Sokolova, A.G. (1987) *Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Rusov, V.A. (1996) *Spectral vibrodiagnostics*. Perm, Vibrotsentr [in Russian].
3. Navalnev, N.I., Kovtun, V.E. (2011) *Application of the method of X-ray fluorescence analysis in tribodiagnostics of gas-pumping units*. Moscow, Gazovaya Promyshlennost, Appendix [in Russian].
4. (1979) *Strength of materials: Manual for higher education institutes*. Ed. by G.S. Pisarenko. Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
5. Vajnberg, D.V. (1973) *Reference book on strength, stability and vibrations of plates*. Kiev, Budivelnik [in Russian].
6. Kudrya, V.D., Navalnev, N.I. (2017) *Comprehensive diagnostics of power mechanical equipment and its information and control software. Idea and mechanism of realization*. Kharkov, Fakt [in Russian].

# ВИЗНАЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПІДШИПНИКА КОВЗАННЯ НА ОСНОВІ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОТОРА ТА ВКЛАДИША

В. М. ДОЦЕНКО<sup>1</sup>, М. І. НАВАЛЬНІСВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». 61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17. E-mail: khai@khai.edu

<sup>2</sup>Харківський територіальний центр філії НВЦ «Техдіагаз». 61002, м. Харків, вул. Маршала Конєва, 16. E-mail: shkorina-enbung@i.ua

У статті розглянуто можливість отримання додаткової інформації про стан підшипника ковзання при проведенні вібраційного обстеження. Пропонується використовувати як джерело інформації коливання контактної площадки підшипника ковзання. Бібліогр. 3, рис. 4.

Ключові слова: віброакустичні вимірювання, ротор, підшипник ковзання, частота вільних коливань, контактна взаємодія

## DETERMINATION OF SERVICEABILITY OF SLIDE BEARING BASED ON CONTACT INTERACTION OF THE ROTOR AND INSERT

V.N. DOTSENKO<sup>1</sup>, N.I. NAVALNEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Aerospace University N.E. Zhukovsky «Kharkiv Aviation Institute», 17 Chkalov, 61070, Kharkiv, E-mail: khai@khai.ua

<sup>2</sup>Kharkiv Territorial Center of SPC «Tekhdiagaz» branch, 16 Marshall Konev Str., 61002 Kharkiv. E-mail: shkorina-enbung@i.ua

The paper deals with the possibility of obtaining additional information about the state of slide bearing during vibration examination. It is proposed to use the vibrations of slide bearing contact pad as a source of information. 3 Ref., 4 Fig.

Keywords: vibroacoustic measurements, rotor, slide bearing, free oscillation frequency, contact interaction

Поступила в редакцію  
21.11.2018



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»  
Международная Ассоциация «Сварка»

## Девятая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

9 – 13 сентября 2019 г.  
Украина, Одесса

Председатель программного комитета  
академик И.В. Кривцун

### Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

## ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ



АДРЕС ОРГКОМИТЕТА  
Украина, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2019>





## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ (Обзор, ч. 1)

Г. М. СУЧКОВ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ

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

Выполнен анализ информационных источников в области чувствительности ультразвукового неразрушающего контроля металлоизделий приборами и установками с электромагнитно-акустическими преобразователями. Установлено, что по сравнению с традиционным контактным методом контроля в своей области применения: контроль металлов без специальной подготовки поверхности, автоматический и автоматизированный контроль с высокой производительностью, электромагнитно-акустический контроль имеет заметные преимущества. Во многих случаях чувствительность дефектоскопии с применением электромагнитно-акустических преобразователей не уступает традиционному контактному методу, а в некоторых случаях даже превышает его. Библиогр. 17, табл. 5.

*Ключевые слова:* электромагнитно-акустический контроль, металлоизделие, чувствительность контроля, выявляемость дефектов, определение физико-механических характеристик металлоизделий, толщинометрия

В обзорных статьях [1, 2] выполнен анализ теоретических и практических подходов к созданию электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (ЭМАП). Установлено значительное увеличение количества и типов новых ЭМАП. Отмечено заметное расширение областей применения приборов и установок бесконтактного ультразвукового контроля с ЭМАП во многих странах мира. В то же время по-прежнему традиционно считается, что главным недостатком ЭМА преобразователей является низкая чувствительность к несоответствиям объектов контроля (ОК), выявление которых регламентируется нормативно-технической документацией. Причем в справочнике [3] указано, что чувствительность ультразвукового ЭМА метода при двойном преобразовании меньше, чем контактного на 4 порядка, а в работе [4], что на 3 порядка. Кроме того, в работе [3] утверждается, что коэффициент преобразования ЭМАП для излучения и приема по отдельности меньше, чем для пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) на 2 порядка. Алешин Н. П. и др. в работе [5] показали, что коэффициент двойного ЭМА преобразования отличается от такого же для ПЭП в 500...1000 раз, а коэффициенты для излучения и приема по отдельности отличаются между собой в 2 раза. При этом в работе [3, стр. 74] отмечается, что ЭМА методом уверенно обнаруживаются модели дефектов незначительного размера. Следует отметить, что Кавашима К. еще в 1976 г. [6] приводил данные о том, что выявляемость плоскодонного отражателя диаметром 1,3 мм ЭМАП и ПЭП практически одинакова. АО «Votum» серийно выпускает приборы ультразву-

кового контроля с ЭМА преобразователями, но при этом отмечает их недостаточную чувствительность? Из опубликованных противоречивых сведений следует необходимость анализа технических возможностей устройств, приборов и установок с ЭМА преобразователями по выявлению дефектов изделий и материалов.

Целью работы является анализ новых литературных источников и определение возможностей устройств с ЭМА преобразователями по чувствительности при измерениях, контроле и диагностике ОК.

**Чувствительность ЭМАП при контроле эхо-методом.** Главными требованиями к средствам ультразвукового контроля являются обнаружение дефектов, измерение толщины и определение физико-механических характеристик ОК. Выполнить эти требования возможно при обеспечении достаточной величины отношения амплитуд полезного сигнала и шума [3, 7]. Первичное отношение амплитуд полезного сигнала и шума, очевидно, зависит от коэффициента ЭМА преобразования, конструкции ЭМАП, характеристик аналоговой части ЭМА прибора и др.

Достаточно подробно вопрос эффективности ЭМА преобразования рассмотрен Буденковым Г. А. и Коробейниковой О. В. в статье [8]. Ими установлено следующее:

- коэффициент двойного преобразования для ПЭП с материалом ЦТС-19 не превышает 19 %;
- коэффициенты ЭМА преобразования в пределах 30 дБ отличаются в зависимости от химического состава стали и ее структурного состояния, а также от температуры ОК;
- при возбуждении ультразвуковых волн коэффициент ЭМА преобразования существенно

превышает аналогичный коэффициент ЭМА преобразования при приеме, что не согласуется, например, с данными работы [3].

Следует отметить, что выводы, полученные в статье [8], ограничиваются низким диапазоном частот для определенных типов волн, и не могут распространяться на общие условия исследования ЭМА преобразования. Это подтверждает вывод работы [1] об отсутствии на сегодня общей теории ЭМА преобразования.

Неволин О. В. и др. в статье [9], не описав конструктивных особенностей преобразователей, привели подробные данные о чувствительности комплекта ЭМА преобразователей различного назначения (табл. 1). Данные получены при выходной импульсной мощности приставки до 20 кВт. Судя по приведенным в статье рисункам, питание ЭМАП осуществлялось пакетными радиоимпульсами неуказанной длительности.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, говорит о сравнимой чувствительности ЭМАП и ПЭП при обнаружении дефектов. Следует отме-

тить, что диапазон частот недостаточен в высокочастотной его части.

Муравьева О.В. и др. в статье [10] привели данные о решении задачи контроля круглых прутков из рессорно-пружинной стали ЭМА методом путем анализа амплитуд импульсов многократных обеганий периметра. Экспериментально показана возможность обнаружения внутренних и поверхностных дефектов размерами более 0,1 мм. В этом случае чувствительность контроля превышает возможности дефектоскопии с помощью ПЭП.

ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» разработало многоканальный ЭМА дефектоскоп ОКО-22М-ЕМА [11], в комплект которого входят ЭМАП со следующими частотами и углами ввода ультразвука: 0,5 МГц – углы ввода 0° и 90°; 1 МГц – углы ввода 0°, 45° и 90°; 2 МГц – углы ввода 0°, 45° и 90°; 4 МГц – углы ввода 0°, 45° и 90°; 5 МГц – углы ввода 0° и 45°; 6 МГц – угол ввода 0°; 8 МГц – угол ввода 0°. На сайте ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» утверждают, что этот дефектоскоп с ЭМАП обеспечивает выявление плоскодонного отража-

Т а б л и ц а 1. ЭМА преобразователи для универсальной ультразвуковой приставки [9]

Наименование преобразователя	Назначение	Чувствительность, соотношение сигнал/шум (с/ш)	Рабочая частота, МГц
Классические ЭМАП для возбуждения и регистрации волн по нормали к поверхности объекта контроля	Регистрация дефектов эхо-методом и зеркально-теневым методом	Торцевое сверление диаметром 3 мм при с/ш 16 дБ	2,5...0,15
Неклассические ЭМАП с подвижным полюсом для возбуждения и регистрации волн по нормали к поверхности объекта контроля	Регистрация дефектов эхо-методом и зеркально-теневым методом	Торцевое сверление диаметром 3 мм при с/ш 26 дБ	2,5...0,15
ЭМАП волн SV под различными углами к поверхности объекта контроля с постоянным полем подмагничивания	Регистрация трещин в трубах, листах и т.п.	5 % толщины стенки при с/ш 10 дБ	2,0...0,15
ЭМАП волн SV под различными углами к поверхности с импульсным полем подмагничивания	Регистрация трещин в трубах, листах и т. п.	5 % толщины стенки при с/ш 20 дБ	2,0...0,15
ЭМАП волн Рэлея и Лэмба с постоянным полем подмагничивания	Регистрация поверхностных и внутренних дефектов в листах и трубах	5 % толщины стенки при с/ш 10 дБ	1,0...0,15
ЭМАП волн Рэлея и Лэмба с импульсным полем подмагничивания	Регистрация поверхностных и внутренних дефектов в листах и трубах	5 % толщины стенки при с/ш 20 дБ	1,0...0,15
ЭМАП волн SH с импульсным полем подмагничивания	Регистрация поверхностных и внутренних дефектов в листах и трубах	5 % толщины стенки при с/ш 16 дБ	1,0...0,15
Классические ЭМАП для возбуждения и регистрации волн по нормали к поверхности объекта контроля с вращающимся полюсом	Измерение анизотропии и дефектометрия	Устойчивое распознавание радиальных и торцевых сверлений диаметром 3 мм	2,5...0,15
Классические ЭМАП с вращающимся вектором поляризации смещения (без вращения полюса)	Измерение анизотропии и дефектометрия	Устойчивое распознавание радиальных и торцевых сверлений диаметром 3 мм	2,5...0,15
Неклассические ЭМАП с вращающимся вектором поляризации смещения	Измерение анизотропии и дефектометрия	Устойчивое распознавание радиальных и торцевых сверлений диаметром 3 мм	2,5...0,15
ЭМАП с комбинированными постоянными и импульсными полями	Измерение дефектов в протяженных объектах	–	–

теля диаметром 2 мм на глубине 136 мм (ЭМАП 4 МГц 0°, контроль прутка диаметром 140 мм) и выявление паза глубиной 0,5 мм и протяженностью 10 мм (ЭМАП 2 МГц 45°, контроль прутка диаметром 140 мм). Эти данные также подтверждают высокую чувствительность контроля ЭМАП.

Предприятие АКС разработало ультразвуковой томограф ЭМА-АР с приемными и передающими 16 элементными антенными решетками, использующий SH тип волн и работающий на частоте 0,5 МГц [12]. За счет применения технологии импульсного подмагничивания отсутствует эффект налипания ферромагнитных частиц на рабочую поверхность ЭМА преобразователя. Для реальных внутренних дефектов получены отраженные эхо-сигналы и после их цифровой фокусировки сформированы образы сечений стенки трубы, позволяющие оценить тип и высоту дефекта. Данная технология дает возможность решить задачу ультразвукового контроля сварных швов без применения контактной жидкости. Устройство надежно обнаруживает в образце трубы толщиной 18 мм пропилов вдоль продольной оси глубиной 2 мм. Очевидно, что данное направление использования ЭМАП является очень перспективным.

Авторы работы [13] использовали для контроля листов из алюминия ЭМА преобразователи, возбуждающие и принимающие волны Лэмба. Контрольно-измерительное устройство содержит несколько преобразователей, расположенных определенным образом. Возбуждение и прием ультразвуковых импульсов осуществляется по разработанной программе, что позволяет исключить «мертвую» зону. Прибор позволяет обнаруживать дефекты, эквивалентные сквозному отверстию диаметром 2 мм и пазы длиной 4 мм, т.е. обеспечивается высокая чувствительность контроля.

В статье [14] подробно рассмотрены возможности по обнаружению внутренних и поверхностных дефектов с применением ЭМА преобразователей. Показано, что объемными сдвиговыми линейно поляризованными импульсами длительностью до 6 периодов частоты заполнения в диа-

пазоне 1,5...2,5 МГц в рельсах на расстояниях до 170 мм гарантировано выявляются модели дефектов, эквивалентные плоскодонному отражателю диаметром 1 мм и более. Без применения каких либо методов обработки отношение амплитуд эхо-сигнала и шума составляло 3...24 раз для плоскодонных отражателей диаметром 1...4 мм. При измерениях зазор между ЭМАП и металлом составлял 0,2 мм.

Для оценки чувствительности применения наклонных ЭМАП с углом ввода 37° импульсами волн SV типа в сталях прямым и однократно отраженным лучом гарантировано обнаруживались канавки глубиной 0,9 мм и более и угол, образованный отверстием диаметром 6 мм с плоскостью поверхности образца, при отношении амплитуд эхо-сигнала и шума, достигающем 40 дБ [14].

Для контроля толстых алюминиевых плит авторы публикации [15] разработали прибор с ЭМА преобразователем, высокочастотная катушка которого выполнена в виде спирали. Согласно результатам эксперимента контрольное устройство может обнаруживать отверстия с плоским дном диаметром 1,2 мм на глубине 60 мм.

Значительный объем информации по выявляемости дефектов ЭМАП приведен в работе [16]. Исследования проведены с использованием широкого диапазона ультразвуковых колебаний – от 2 до 5 МГц. Полные исследования выполнены на частоте 2,3 МГц. Результаты исследований отрезка рельса Р65 (высота 180 мм) АО МК «Азовсталь» приведены в табл. 2.

Исследованная рельсовая проба до изготовления отражателей характеризовалась хорошими акустическими характеристиками. Флуктуация ослабления упругих колебаний по длине не превышала 1 %. Высокое качество металла позволило уверенно выявлять плоскодонные отражатели диаметром 0,9 мм и более на глубине от 7,9 до 169,5 мм. Для сравнения провели исследования пробы с помощью серийного дефектоскопа УД2-12, уверенно зафиксировав плоскодонные отражатели диаметром 2 мм и более.

Результаты исследований пробы круглой горячекатаной заготовки диаметром 230 мм (Днепропетровский МК им. Дзержинского, Украина) приведены в табл. 3.

**Таблица 2. Результаты исследований по обнаружению плоскодонных отражателей в рельсовом образце**

Зона контроля	Диаметр плоскодонного отражателя, мм	Расстояние до отражателя, мм	Отношение амплитуд эхо-сигнал/шум, раз
Зона, ограниченная шейкой рельса и его высотой	4	169,5	>33 (сигнал ограничен)
	3	158	27
	2	162	11
	0,9	164	3,5
Головка рельса со стороны одной боковой грани	3	62	30
	2	60,5	17
	0,9	59	6
Шейка рельса сбоку в центральной части	3	8,5	15
	2	7,9	7
	0,9	8,2	2



Таблица 3. Результаты исследований выявляемости цилиндрических отражателей в круглой горячекатаной заготовке

Диаметр бокового цилиндрического отражателя, мм	Расстояние до отражателя, мм	Отношение амплитуд эхо-сигнал/шум, раз
1	30	23
1,5	28	22
2,5	8	16
2,5	10,3	12
2,5	27	32,5
2,5	48	12,5
2,5	60	11
2,5	115 (центр заготовки)	2 до 3-х из некоторых точек периметра

Исследования акустических свойств показали, что образец круглой заготовки диаметром 230 мм имеет много участков с повышенным ослаблением ультразвуковых импульсов. Такие участки расположены случайным образом по сечению металла и по длине. В центральной части заготовки зона повышенного ослабления ультразвуковых импульсов в диаметре достигала 60...90 мм в зависимости от направления озвучивания. В других заготовках, в том числе и НЛЗ, центральные части также обладают повышенным ослаблением ультразвуковых импульсов. Отмеченные особенности обуславливают неравномерность чувствительности как по сечению, так и по длине заготовки. Но во всех случаях боковые отражатели диаметром 2,5 мм на глубине от 8 до 115 мм и диаметром 1 мм на глубине от 8,2 до 30 мм обнаруживаются надежно.

Результаты исследований горячекатаной квадратной заготовки 127×127 мм из стали 45 приведены в табл. 4. Центральная часть этой заготовки также имеет зону повышенного в два-три раза ослабления ультразвуковых импульсов. Обнаружены локальные участки с повышенным ослаблением упругих колебаний по сечению и длине заготовки.

Таблица 5. Результаты исследований выявляемости плоскодонного отражателя диаметром 2 мм и «мертвой» зоны контроля

Образец	Частота, МГц	$A_{дон}/A_{ш}$ , раз	$A_{эхо}/A_{ш}$ , раз	Расстояние до дефекта, мм	«Мертвая» зона, мм
Латунный стержень диаметром 24,8 мм	2,5	20	11	14	6,2
Лист алюминиевый толщиной 7,9 мм	4,1	38	15	4,6	3,9
Лист из стали 45 толщиной 11 мм	2,3	35	22,5	8	6
Лист дюралюминиевый толщиной 20 мм	3	30	12,5	13,7	6,2
Сталь нержавеющая толщиной 7 мм	3	15	6,5	5	4
Отбеленный чугуn толщиной 14,4 мм	3	32,5	-	Отражателя нет	5,6
Рельсовая сталь толщиной 16,7 мм	2,5	48	23	8,2	5,1
Головка рельса Р65	2,5	22	10	43,9	6,7
Лист из стали 09Г2С толщиной 40 мм	2,3	30	7,5	20	5,5
Пруток калиброванный диаметром 10,25 мм из стали 40Х13	3	30	23	6,8	4,1
Пруток калиброванный диаметром 8 мм из стали ШХ15	3	32	22	5,2	4
Медный стержень диаметром 32 мм	2,2	21	10	9,6	5,2

Примечание: Под «шумом» здесь принято считать все типы шумов и помех, зафиксированных аппаратурой.

Таблица 4. Результаты исследований выявляемости цилиндрических отражателей в горячекатаной квадратной заготовке

Диаметр плоскодонного отражателя, мм	Расстояние до отражателя, мм	Отношение амплитуд эхо-сигнал/шум, раз
4	115	10
3	113	5
2	115	3

Так как металл объектов, исследуемых ЭМА способом, является элементом преобразователя, то следует ожидать влияния свойств этих материалов на результаты измерений и, соответственно, неразрушающего контроля. В известной литературе не удалось обнаружить сведений о влиянии материала на выявляемость внутренних дефектов. Поэтому выполнены экспериментальные исследования чувствительности ЭМА способа при контроле образцов из различных материалов [17]. Во всех исследованных образцах для получения одинаковых результатов изготовлены плоскодонные отражатели диаметром 2 мм. Для исследований был изготовлен макет ЭМА дефектоскопа, позволяющий возбуждать и принимать ультразвуковые импульсы в диапазоне 1...5 МГц длительностью 1...10 периодов частоты заполнения и частотой следования до 2,8 кГц. Дефектоскопический стенд снабжен прямыми ЭМАП на частоту от 2 до 5 МГц. Рабочая зона ЭМАП 7×12 мм². Индукция поляризующего магнитного поля – 1,35 Тл. Масса преобразователей составляла менее 75 грамм. Результаты выполненных исследований приведены в табл. 5.

В табл. 5:  $A_{дон}/A_{ш}$  – отношение амплитуд первого донного импульса и шума;  $A_{эхо}/A_{ш}$  – отношение амплитуд эхо-сигнала и шума.

Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод о том, что практически во всех наиболее часто используемых материалах, ЭМА способом возбуждаются и принимаются ультразву-

вуковые импульсы с амплитудой, достаточной для обнаружения плоскодонных отражателей диаметром 2 мм и более. При этом «мертвая» зона составляет 3,9...6,7 мм. Установлено, что подстройка режима работы ЭМА дефектоскопа на контроль конкретного материала позволяет уменьшить величину «мертвой» зоны до 3...4 мм.

При выполнении исследований обнаружен металл (ЛС63) с высокой электропроводностью, в котором амплитуда полезного сигнала на частотах 1...4 МГц, как минимум, на 40...50 дБ меньше, чем у известных материалов. Такой металл целесообразно использовать для изготовления акустических экранов ЭМАП.

Сравнительные исследования этих же образцов с помощью серийного дефектоскопа УД2-12 показали, что его чувствительность не превышает чувствительности ЭМА дефектоскопа. Более того, для дефектоскопии стержней приходится притирать пьезоэлектрические преобразователи. Для контроля всех образцов ЭМА дефектоскопом применен ЭМА преобразователь без изменения его конструкции.

## Выводы

1. Из результатов приведенных исследований можно сделать вывод, что в подавляющем числе наиболее распространенных электропроводных и (или) ферромагнитных материалов ЭМА способом обнаруживаются плоскодонные отражатели диаметром 1 мм и более чувствительностью, не уступающей чувствительности ПЭП.

2. При исследованиях обнаружен металл (ЛС63) с высокой электропроводностью, в котором амплитуда полезного сигнала на частотах 1...4 МГц, как минимум, на 40...50 дБ меньше, чем у известных материалов. Проводить контроль изделий из такого металла ЭМА способом практически невозможно. Обнаружение металла, в котором импульсы упругих колебаний ЭМА способом практически не возбуждаются, позволило изготовить эффективные электромагнитные экраны для малогабаритных ЭМАП, работающих в совмещенном режиме.

## Список литературы

- Плеснецов С. Ю., Сучков Г. М., Корж А. И., Суворова М. Д. (2018) Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 24–31.
- Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю., Корж А. И. и др. (2018) Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. (Обзор). *Там же*, 3, 27–34.
- Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. (2004) Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Клюев В. В. (ред.). Т.3: *Ультразвуковой контроль*. Москва, Машиностроение.
- Цапенко В. К., Куц Ю. В. (2010) *Основи ультразвукового неруйнівного контролю*. Підручник. Київ. НТУУ «КПІ».
- Алешин Н. П., Белый В. Е., Вopilкин А. Х. и др. (1989) *Методы акустического контроля металлов*. Алешин Н. П. (ред.). Москва, Машиностроение.
- Kawashima K., McClung R. (1976) Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radials polarized transverse. *Materials Evaluation*, 34, 4, 81–90.
- Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Хомяк Ю. В. (2015) *Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 3. Методы и средства повышения чувствительности ультразвукового контроля ЭМА способом*. Харьков, Щедра садиба плюс.
- Буденков Г.А., Коробейникова О. В. (2009) Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования. *Там же*, 4, 40–49.
- Астафьев А. Н., Неволин О. В., Мамай А. М. и др. (2006) Универсальная приставка для стандартных ультразвуковых дефектоскопов и толщиномеров. *Там же*, 7, 73–82.
- Муравьева О. В., Муравьев В. В., Стрижак В. А. и др. (2013) Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин. *В мире неразрушающего контроля*, 1, 62–70.
- <http://www.ultracon-service.com.ua/index.php/ru/flaw-detectors/item/85-ema-ultrazvukovoj-defektoskop-okolo-22m-ema>.
- <http://docplayer.ru/45792425-Vozmozhnosti-i-sposoby-izmereniya-glubiny-krn-ultrazvukovym-metodom-nerazrushayushchego-kontrolya.html>.
- Guo-fu Zhai, Bo Liu, Chao-ran Deng et al. (2014) An inspection device based on multiple Lamb wave electromagnetic acoustic transducers. *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation. Testing. IEEE Conference Publications*, pp. 14–18, DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928225
- Сучков Г. М., Донченко А. В. (2007) Реальная чувствительность ЭМА приборов. *Дефектоскопия*, 6, 43–50.
- Yakun Wang, Pengzhan Li, Bo Liu, Guofu Zhai. (2013) *A portable inspection instrument based on electromagnetic acoustic transducers. Far East Forum on Nondestructive Evaluation. Testing: New Technology*, pp. 192–196, DOI: 10.1109/FENDT.20.
- Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Хащина С. В. и др. (2013) Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катаных ферромагнитных изделий. *Контроль. Диагностика*, 4, 31–35.
- Сучков Г. М. (2005) *Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий*: дис. д-ра техн. наук. Харьков, НТУ «ХПИ».

## References

- Plesnetsov, S.Yu., Suchkov, G.M., Korzh, A.I., Suvorova, M.D. (2018) New theoretical investigations and developments in the field of electromagneto-acoustic transformation (Review). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 24–31 [in Russian].
- Suchkov, G.M., Plesnetsov, S.Yu., Korzh, A.I., Suvorova, M.D., Yudanova, N.N. (2018) New developments of electromagneto-acoustic transducers (Review). *Ibid.*, 3, 27–34 [in Russian].
- Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) Non-destructive testing: Handbook. In: 7 Vol. Ed. by V.V. Klyuev. V. 3: *Ultrasonic testing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Tsapenko, V.K., Kuts, Yu.V. (2010) *Fundamentals of non-destructive ultrasonic testing: Handbook*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].
- Aleshin, N.P., Belyy, V.E., Vopilkin, A.Kh. et al. (1989) *Methods of acoustic testing of metals*. Ed. by Aleshin, N.P. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Kawashima, K., McClung, R. (1976) Electromagnetic ultrasonic transducer for generating and detecting longitudinal waves (with a small amount of radials polarized transverse. *Materials Evaluation*, 34(4), 81–90.
- Sychkov, G.M., Petrishchev, O.N., Khomyak, Yu.V. (2015) Theory and practice of electromagneto-acoustic testing. Pt 3: *Methods and means of increase of sensitivity by ultrasonic EMA testing*. Kharkov, Shchedra Sadyba Plus [in Russian].
- Budenkov, G.A., Korobeynikova, O.V. (2009) The influence of metal chemical structure and temperature on efficiency of

- electromagneto-acoustic transformation. *Defektoskopiya*, **4**, 40-49 [in Russian].
9. Astafiev, A.N., Nevolin, O.V., Mamaj, A.M. et al. (2006) Universal add-on for standard ultrasonic defectoscopes and thickness gauges. *Ibid.*, **7**, 73-82 [in Russian].
  10. Muraviova, O.V., Muraviov, V.V., Strizhak, V.A. et al. (2013) Real sensitivity of input acoustic testing of rod samples in spring production. *V Mire Nerazrushayushchego Kontroliya*, **1**, 62-70 [in Russian].
  11. <http://www.ultracon-service.com.ua/index.php/ru/flaw-detectors/item/85-ema-ultrazvukovoj-defektoskop-oko-22m-ema> [in Russian].
  12. <http://docplayer.ru/45792425-Vozmozhnosti-i-sposoby-izmereniya-krn-ultrazvukovym-metodom-nerazrushayushchego-kontroliya.html> [in Russian].
  13. Guo-fu Zhai, Bo Liu, Chao-ran Deng, Yong-qian Li, Lei Kang (2014) An inspection device based on multiple Lamb wave electromagnetic acoustic transducers. In: *Proc. of 2014 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing*, 14-18. DOI: 10.1109/FENDT.2014.6928225.
  14. Suchkov, G.M., Donchenko, A.V. (2007) Actual EMA-device sensitivity. *Defektoskopiya*, **6**, 43-50 [in Russian].
  15. Yakun Wang, Pengzhan Li, Bo Liu, Guofu Zhai (2013) A portable inspection instrument based on electromagnetic acoustic transducers. In: *Proc. of 2013 IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology*, 192-196. DOI: 10.1109/FENDT.20.
  16. Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Khashchina, S.V. et al. (2013) The increase in functionality of no-contact defect detection for roll-formed ferromagnetic products. *Kontrol. Diagnostika*, **4**, 31-35 [in Russian].
  17. Suchkov, G.M. (2005) *Development of theory and practice in electromagnetic-acoustic testing device building for metal product testing*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kharkov, NTU KhPI [in Russian].

#### ЧУТЛИВІСТЬ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ (Огляд, ч.1)

Г. М. СУЧКОВ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ

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

Виконано аналіз інформаційних джерел в області чутливості ультразвукового неруйнівного контролю металовиробів приладами і установками з електромагнітно-акустичними перетворювачами. Встановлено, що в порівнянні з традиційним контактним методом контролю в своїй галузі застосування: контроль металу без спеціальної підготовки поверхні, автоматичний і автоматизований контроль з високою продуктивністю, електромагнітно-акустичний контроль має помітні переваги. У багатьох випадках чутливість дефектоскопії із застосуванням електромагнітно-акустичних перетворювачів не поступається традиційному контактному методу, а в деяких випадках навіть перевищує його. Бібліогр. 17, табл. 5.

Ключові слова: електромагнітно-акустичний контроль, металовиріб, чутливість контролю, виявлення дефектів, визначення фізико-механічних характеристик металовиробів, товщинометрія

#### SENSITIVITY OF TESTING VIA ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS (OVERVIEW, P. 1)

G. M. SUCHKOV, S. YU. PLESNETSOV  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».  
61002, Kharkiv, 2 Kirpichova st.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

The analysis of information sources in the field of sensitivity of ultrasonic non-destructive testing of metal products by instruments and devices with electromagnetic-acoustic transducers was performed. It is established that, in comparison to the traditional contact testing method in its field of application: the testing of metals without special surface preparation, automatic and automated testing with high productivity, EMA testing has significant advantages. In many cases, the sensitivity of flaw detection using EMAT is not inferior to the traditional contact method, and in some cases even exceeds it. 17 Re., 5 Tabl.

Key words: electromagnetic-acoustic control, metalware, testing sensitivity, detectability of defects, determination of physical-mechanical characteristics of metal products, thickness measurement.

Поступила в редакцию  
17.09.2018

### Новая книга

**Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент:** Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с.

Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».





# ОСОБЛИВОСТІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШАХТНИХ КОПРІВ

**В. А. КУЛІШ, Е. С. КРИЛОВ**

ДП «Інститут «УкрНДІпроект» Міненерговугілля України. 03142, м. Київ, просп. Академіка Палладіна, 46/2.

E-mail: [post.unp@ukr.net](mailto:post.unp@ukr.net)

Розроблено стандарт Міненерговугілля України СОУ-Н10.1.00174125.002:2012 «Порядок і організація обстеження залізобетонних копрів», який регламентує процедури контролю і оцінки технічного стану несучих конструкцій і враховує специфіку інструментальних обстежень залізобетонних виробів з використанням сучасних методів і засобів неруйнівного контролю. Він відповідає вимогам діючих законодавчих і нормативних документів та сприяє підвищенню безпеки і надійності експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки за рахунок своєчасного одержання інформації про фактичний технічний стан шахтних копрів. Бібліогр. 9, табл. 5, рис. 3.

*Ключові слова:* контроль, технічний стан, копер, залізобетонна конструкція, інструментальне обстеження, дефект, пошкодження, надійність, безпека

Одним з найбільш відповідальних і розповсюджених видів гірничотехнічних споруд шахтової поверхні є шахтні копрі, які призначені для розміщення підйомної установки і відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки.

В теперішній час на вугільних підприємствах України експлуатується близько 50 залізобетонних (баштових) копрів. Більшість з них побудовано 40...50 років тому, в результаті чого спрацювання їх становить 50...70 % і має тенденцію до зростання. При цьому останнім часом мали місце випадки крупних аварій і небезпечних руйнувань цих об'єктів з тяжкими наслідками.

Тому ці об'єкти повинні підлягати систематичному контролю і оцінці технічного стану, що регламентується, зокрема, Постановою Кабміну від 26 травня 2004 р. за № 687 «Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки» [1].

За конструктивними схемами залізобетонні баштові копрі діляться на три групи:

- з несучими стінами із монолітного залізобетону;
- з несучим сталевим рамним каркасом і навісними залізобетонними панелями в якості стінового огороження;
- з несучим каркасом із залізобетонних елементів.

Сталеві каркаси копрів, які складаються з колон, ригелів і зв'язків, виготовляються в заводських умовах і за допомогою кранів монтуються над стовбуром.

Покриття копрів виконується зі збірних залізобетонних плит, які укладаються по сталевих фермах.

Міжповерхові перекриття виконуються із збірних залізобетонних плит, як правило з монолітного залізобетону, які укладаються по сталевих балках. На рис. 1 наведено баштовий копер із монолітного залізобетону.

Основними дефектами і пошкодженнями бетонних і залізобетонних конструкцій є:

- тріщини і підвищені деформації від силових впливів (статичних і динамічних);
- корозійні пошкодження бетону, арматури, сполучних закладних деталей;
- пошкодження від перемінного зволоження-замороження-відтаювання;
- температурні деформації при невідповідності відстаней між температурно-усадковими швами умовам експлуатації;
- тріщини в елементах каркаса й конструкцій, що огорожують, від нерівномірного осідання фундаментів (у тому числі на підроблюваних територіях);

- пошкодження механічні, від вогню й т. ін.

Згідно з НПАОП 45.2-1.01-98 [2] технічний стан будівельних конструкцій, споруд поділяється на 4 категорії, яким відповідають наявність в них відповідних дефектів і пошкоджень.

Класифікаційні ознаки технічного стану (категорії) основних типів несучих і огорожувальних конструкцій залізобетонних копрів, які визначаються при візуальних обстеженнях, наведені в табл. 1 і 2.

Оцінка технічного стану несучих конструкцій залізобетонних шахтних копрів передбачає проведення крім візуальних обстежень також інструментальні обстеження (табл. 3) для визначення:

- лінійних параметрів конструкцій;
- міцності бетону;
- характеристик армування;

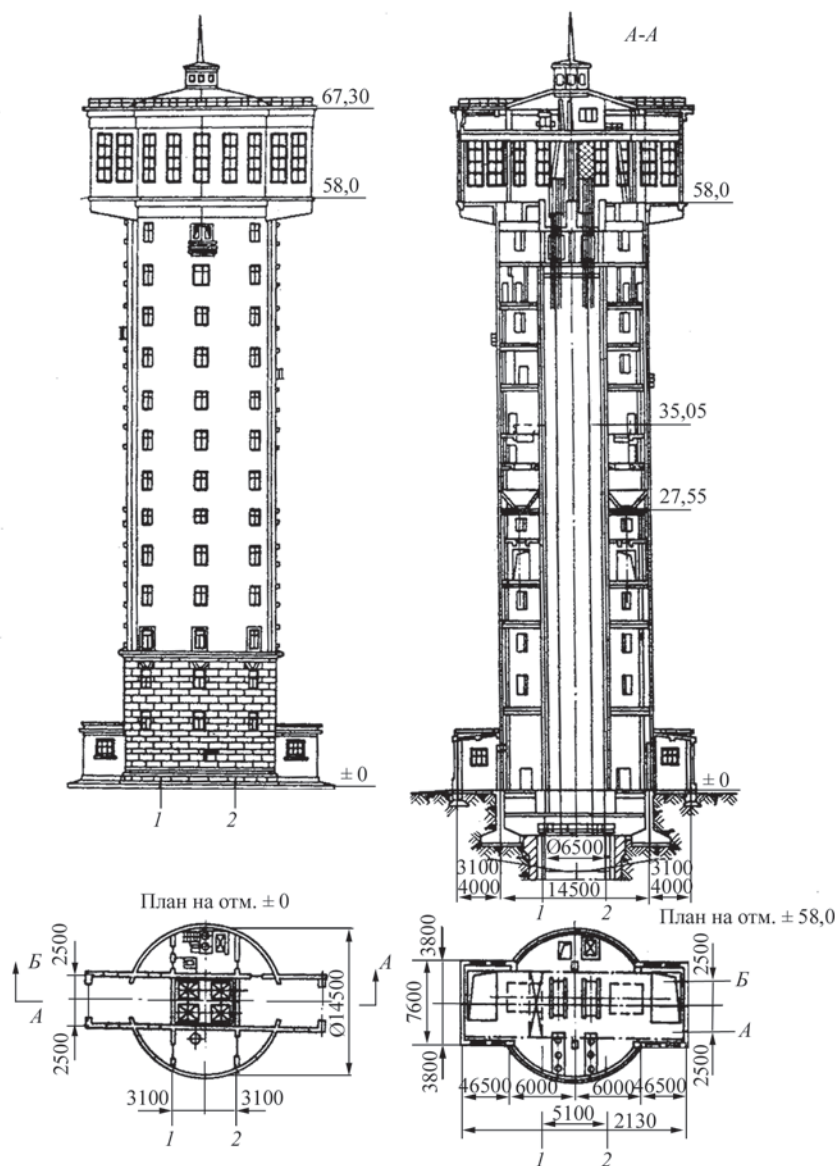


Рис. 1. Баштовый копер із монолітного залізобетону

– дефектів і пошкоджень в залізобетонних і металевих конструкціях копрів.

При визначенні міцності бетону і характеристик армування залізобетону широко використовуються неруйнівні фізичні методи контролю.

Для визначення міцності бетону копра застосовують методи згідно ДСТУ БВ.2.7-220:2009 [3] і ДСТУ БВ.2.7-226:2009 [4]:

- пружного відскоку;
- ударного імпульсу;
- пластичної деформації;
- відриву;
- сколювання ребра;
- відриву і сколювання;
- імпульсний ультразвуковий.

Міцність бетону визначається за попередньо встановленими градуванням залежностями між міцністю бетонних зразків на стиск, випробуваних згідно з ДСТУ БВ.2.7-214:2009 [5], та непрямыми характеристиками міцності.

При випробуванні ультразвуковим неруйнівним методом контролю використовується залежність між швидкістю поширення ультразвукових коливань у бетоні та його міцністю. Ультразвукові коливання в бетоні проводять способами наскрізного або поверхневого прозвучування відповідно (рис. 2)

Міцність бетону в конструкціях визначається за експериментально встановленими залежностями «Швидкість поширення ультразвуку – міцність бетону» або «Час

поширення ультразвуку – міцність бетону» в залежності від способу прозвучування.

При визначенні характеристик армування залізобетонних конструкцій з'ясовують наступне:

- кількість шарів арматури;

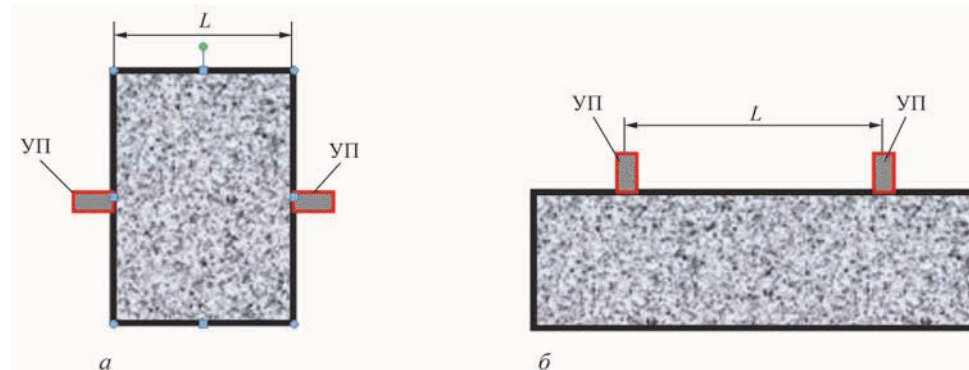


Рис. 2. Способи ультразвукового прозвучування бетону: а – схема випробування бетону способом наскрізного прозвучування; б – схема випробування бетону способом поверхневого прозвучування; УП – ультразвукові перетворювачі; L – база прозвучування

**Таблиця 1. Класифікаційні ознаки технічного стану каркасів споруд, міжповерхових перекриттів із збірного і монолітного залізобетону**

Категорія технічного стану за НПАОП 45.2-1.01-98	Дефекти і пошкодження	Можливі причини виникнення	Можливі наслідки
«1»	Волосяні тріщини із запливними берегами, що не мають чіткої орієнтації, переважно на верхній (при виготовленні) поверхні	Усадка внаслідок порушення режиму тепло-влогої обробки бетонної суміші, властивостей цементу й т. п.	На несучу здатність не впливають
«2»	Волосяні тріщини уздовж арматур, слід іржі на поверхні бетону	1) Корозія арматур (шар корозії до 0,5 мм) при втраті бетоном захисних властивостей (наприклад, при карбонізації). 2) Початкова фаза розколювання бетону внаслідок тиску продуктів корозії арматури й порушення зчеплення з арматурою	1) Орієнтовне зниження несучої здатності до 5 %. Можливе зниження довговічності. 2) Можливе зниження несучої здатності. Ступінь зниження повинна оцінюватися з урахуванням наявності інших дефектів, пошкоджень і результатів перевірного розрахунку
«3»	Ушкодження арматури й закладних деталей (надрізи, вириви й т. п.) часто при сполученні з попередніми дефектами	Механічні впливи	Зниження несучої здатності пропорційно зменшенню площі перетину
«2» – «3» (встановлюється розрахунком)	Сколювання бетону	Механічні впливи	При розташуванні в стиснутій зоні зниження несучої здатності за рахунок зменшення площі перетину
«3» – «4»	Тріщини вздовж арматурних стрижнів до 3 мм. Явні сліди корозії арматури	Розвиваються внаслідок корозії арматури. Товщина шару корозії до 3 мм	Зниження несучої здатності в залежності від зменшення площі перетину арматури і розмірів виключеного із роботи бетону стиснутої зони. Зменшення несучої здатності нормальних перетинів внаслідок порушення зчеплення арматури з бетоном орієнтовно до 20 %. Для попередньо-напруженої арматури і розміщені на приопорних ділянках – стан аварійного зчеплення арматури с бетоном орієнтовно до 20 %
«3»	Нормальні тріщини в конструкціях, які працюють на вигин, і розтягнутих елементах конструкцій шириною розкриття для сталі класа: А-I – більше 0,5 мм; А-I, А-II, А-IIIв, А-IV – більше 0,4 мм; в інших випадках – більше 0,3 мм	Перевантаження конструкцій. Зміщення положення при виготовленні розтягнутої арматури. Для перенапружених конструкцій – недостатнє зусилля натягу арматури	Ступінь небезпеки визначається в залежності від наявності інших дефектів і причин, які визвали підвищене розкриття тріщин
«3» – «4»	Відносні прогини, які перевищують для: перенапружених кроквяних ферм -1/800; перенапружених кроквяних балок и балок перекриття – 1/400; плит перекриття і покриття – 1/200	Перевантаження конструкцій, зменшення робочого перерізу бетону і арматури	Ступінь небезпеки визначається в залежності від наявності інших дефектів. При сполученні з попереднім дефектом – стан аварійний
«3» – «4» (встановлюється розрахунком)	Відшарування захисного шару бетону	Корозія поздовжньої і поперечної арматури	Зниження несучої здатності в залежності від зменшення площі арматури внаслідок корозії і зменшення розмірів поперечного перетину стиснутої зони
«3» – «4»	Зменшення площадок обпирання конструкцій порівняно із проектними	Помилки при виготовленні й монтажі	Можливе зниження несучої здатності; при критичному зменшенні – аварійне
«4»	Випирання стиснутих арматур, поздовжні тріщини в стиснутій зоні, лущення бетону стиснутої зони	Перевантаження конструкцій	Небезпека обвалення
«4»	Те ж, що й у попередньому випадку, але є тріщини з розгалуженими в стиснутій зоні кінцями	Перевантаження конструкцій внаслідок зниження міцності бетону або порушення зчеплення арматури з бетоном	Небезпека обвалення
«4»	Косі тріщини 1,5 мм і більше зі зміщенням ділянок балки відносно одна одної й косі тріщини, які перетинають арматуру	Перевантаження конструкцій. Порушення анкерування	Те ж саме
«4»	Розриви або зміщення поперечних арматур у зоні косих тріщин	Перевантаження конструкцій	->-
«4»	Відрив анкерів від пластин закладних деталей, руйнування стиків або їх елементів	Наявність впливів, не передбачених при проектуванні; відхилення від проекту при виконанні стиків	->-



Таблиця 2. Класифікаційні ознаки технічного стану огорожувальних конструкцій (навісних панелей)

Категорія технічного стану за НПАОП 45.2-1.01-98	Дефекти і пошкодження	Можливі причини виникнення	Можливі наслідки
«1» Нормальне	Пошкодження розчину у швах по довжині не більше 10 %, розкриття тріщин до 0,2 мм на поверхні фактурного шару, наявність антикорозійного покриття на площі більше 70 % від загальної	Усадка, волого-температурні впливи	Погіршення умов експлуатації приміщень
«2» Задовільне	Пошкодження розчину у швах по довжині до 50 %, тріщини у фактурному шарі шириною розкриття в 0,4 мм, корозія арматури і елементів кріплення зі зменшенням перетину до 15 %	Теж	Погіршення умов експлуатації приміщень, зниження довговічності панелей
«3» Непридатне для нормальної експлуатації	Пошкодження з'єднань, тріщини в різних напрямках шириною розкриття більше 0,4 мм. Відшарування 30 % захисного шару. Зволоження бетону навколо швів. Зменшення площі перетину арматури більш ніж на 15 %	Усадка, волого-температурні впливи, нерівномірна осадка каркаса	Непридатність приміщень до експлуатації
«4» Аварійне	Порушення з'єднань зі зміщенням панелей, корозійне пошкодження матеріалу стіни на глибину більше 1/3 товщини й довжиною більше 10 м із втратою площі з'єднань і арматури більш ніж 30 %. Косі тріщини у вузлах обпирання, нормальні в прольоті шириною розкриття приховання більше 1,0 мм	Усадка, волого-температурні впливи, нерівномірна осадка каркаса	Обвалення панелей

Таблиця 3. Основні методи і засоби для проведення інструментальних обстежень залізобетонних копрів

Вид випробувань (визначення)		Методи і засоби контролю					Примітка
		механічний, візуально-оптичний	ультразвуковий	магнітний	акустико-емісійний	лазерний	
1		2	3	4	5	6	7
Лінійних параметрів		Лінійка металева ГОСТ 427-75, рулетка ГОСТ 7502-89, бінокль, лупа, штангенциркуль ГОСТ 166-89, геодаліт, нівелір	Товщиноміри УТ-31, ТУЗ-1, ТУЗ-2, ТУЗ-3	-	-	Лазерний далекомір DSC-S650	
Міцності бетону	Зразки, відібрані з конструкції	Лінійка металева, штангенциркуль	-	-	-	-	
	Метод ударного імпульсу	SCHMIDT-HAMMER типу РС N, Ц-22 склерометр ОМШ-1, склерометр електронний ОНИКС-2.3	-	-	-	-	
	Метод пластичних деформацій	Склерометр ИП-С-МГ4.03	-	-	-	-	
	Метод відриву	ГПНВ-5	-	-	-	-	
	Метод сколювання ребра	ПОС-50МГ4 «Скол»	-	-	-	-	
	Метод відриву зі сколюванням	ГПНС-4		-	-	-	
	Неруйнівний, фізичний	-	УК-14ПМ, УК-39, УКС-МГ4, УД2-41, UD4-94				
Характеристик армування	Товщина захисного шару бетону	-	-	ИПА-Г4, ИПА-Г4.01, ИЗС-10Н	-	-	
	Кількість шарів арматури	-	-		-	-	
	Діаметр і крок стрижнів арматури	-	-		-	-	
Дефектів і пошкоджень	В залізобетонних конструкціях	Лупа, штангенциркуль, щуп	УК-14ПМ, УК-39, УКС-МГ4, УД2-41, UD4-94	-	-		
	В металевих конструкціях		Товщиноміри УТ-31, ТУЗ-1, ТУЗ-2, ТУЗ-3	-	А-Line 32D, комплекс «КОМ-ПАС», «КАРАТ»		
	В зварних швах						
	Корозія	Лупа, лінійка металева					

Таблиця 4. Характерні пошкодження металоконструкцій залізобетонних копрів

Вид пошкоджень	Навантаження і впливи	Елементи і вузли, у яких може виникнути пошкодження
Механічні пошкодження, викликані аварійною ситуацією	Навантаження на шків тертя піднімальної машини від аварійного зусилля в головних канатах	Пластичні деформації в поясах, стінці, опорних ребрах головних балок машинного залу
		Тріщини в зварних швах головних балок машинного залу раніше всього в опорних вузлах
	Удар посудиною, що піднімається або падає	Місцеві ушкодження поясів і стінок головних балок машинного залу
		Тріщини в поясних зварних швах головних балок
		Повне руйнування балок перекриття машинного залу й настилу, що опирається на них
		Руйнування розстрілів у верстаті копра 9більші пластичні деформації, пов'язані із втратою стійкості, руйнування опорних вузлів)
		Місцеві руйнування герметичного обшивання.
		Руйнування балок для кріплення амортизуючих пристроїв (або їхніх вузлів обпирання) у випадку виходу посудини із провідників або защемлення канатів в амортизаторах
		Деформації й руйнування балок стінок противометанової камери
	Горизонтальне навантаження на балки поперек їхньої осі від шківів для заміни канатів. Виникають внаслідок того, що в деяких випадках змушено застосовуються знімні горизонтальні зв'язки, які забувають установити при зміні канатів	Обвалення балок і шківів для заміни канатів у стовбур шахти. Руйнування, внаслідок цього, розстрілів і в тому числі у верстаті копра
Різка посадка кліті на кулаків	Зріз стінок підкулачних балок	
	Тріщини у зварних швах вузлів обпирання підкулачних балок або зріз цих швів	
Механічні пошкодження, викликані аварійною ситуацією	Зависання вугілля або породи в приймальній лійці й тічці скипового підйомника, що викликає падіння частини застряглої маси з утворенням депресії	Деформація або повне руйнування тічки скипового підйомника
		Тріщини або розриви в похилих стінках бункера (у верхній його частині)
Стирання поверхонь металоконструкцій	Абразивний вплив вугілля або породи на стінки бункерів у місцях відсутності футеровки	Зменшення товщини стінок бункера в результаті стирання

Таблиця 5. Дефекти і пошкодження вузлів і елементів металевих конструкцій, які контролюються при обстеженні залізобетонних копрів

Найменування вузлів і елементів металевих конструкцій (МК)	Види дефектів і пошкоджень												
	Зігнутість, скручування	Вигнутість, (випуклість)	Вирізи	Корозія	Тріщини в металі	Розшарування	Дефекти зварних швів	Дефекти болтових з'єднань	Пошкодження антикорозійного покриття	Пошкодження футеровки	Порушення герметизації	Відсутність знімних елементів	Дефекти вогнистого покриття
1. МК перекриття машинного залу	+	+	+	—	+	—	+	—	+	—	—	—	—
2. МК покриття	—	—	—	+	—	—	+	—	+	—	—	—	—
3. МК перекриття і монтажних прорізів	+	—	+	+	+	—	+	+	+	—	+	+	—
4. МК протиметанової камери	+	+	+	+	+	—	+	—	+	—	+	—	—
5. МК в станку копра, в т. ч.:													
5.1 Розпори	+	—	+	+	+	—	+	+	+	—	—	—	—
5.2 Підкулачні балки	+	—	+	+	—	+	+	—	+	—	—	—	—
5.3 Протипожежні герметичні ляди	+	+	+	+	—	+	+	+	+	—	+	+	—
5.4 Балки амортизуючих пристроїв	+	—	+	+	+	—	+	+	+	—	—	—	—
5.5 Балки і зв'язки під шківів для перенавіски канатів	+	—	+	+	+	—	+	+	+	—	—	—	—
6. МК резервуарів для води	—	+	—	+	—	—	+	—	+	—	+	—	—
7. МК внутрішніх етажерок, малих сходин, площадок для обслуговування	+	—	+	+	—	—	+	+	+	—	—	—	—
8. МК головної сходової кліті і ліфтового відділення	+	—	—	+	—	—	+	+	+	—	—	—	+

Продовження таблиці 5.

9. МК зовнішніх пожежних сходів	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-
10. МК герметизації станка, герметичних тамбурів-шлюзів, камер, переходів	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+
11. МК герметичних дверей і воріт, жалюзійних решіток	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	+
12. МК вентиляційних камер	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
13. МК бункерів для вугілля і породи в т. ч. закладні деталі	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
14. Балки під відхиляючі шківи	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-

– для кожного шару арматур: діаметр арматури, клас арматур, крок стрижнів, величину захисного шару бетону.

Для визначення товщини захисного шару залізобетону й розташування арматури застосовують прилади «ІЗС-10Н», «ІКАР». Спосіб визначення характеристик армування залізобетону наведено на рис. 3.

Зважаючи на те, що конструкції залізобетонних (баштових) копрів включають несучі металеві елементи і вузли, останні підлягають систематичному контролю.

В табл. 4 наведено характерні пошкодження металоконструкцій залізобетонних копрів, а в табл. 5 дефекти і пошкодження вузлів і елементів металоконструкцій, які контролюються при обстеженні залізобетонних копрів.

Вибір методів неруйнівного контролю несучих металоконструкцій для інструментальних обсте-

жень залізобетонних копрів може бути ефективно здійснений згідно рекомендацій роботи [6].

За результатами обстежень виконується розрахункова оцінка і паспортизація технічного стану конструкцій.

Перевірний розрахунок конструкцій виконується з урахуванням виявлених при обстеженні дефектів і пошкоджень за ДБНВ.3.1-1-2007 [7].

Шляхом спільного аналізу дефектів і пошкоджень, а також результатів перевірних розрахунків визначається технічний стан окремих конструкцій відповідно до ДСТУ-НБВ.12-18:2016 [8].

Викладені в статті особливості контролю технічного стану несучих конструкцій залізобетонних шахтних копрів закладені в методику їх обстеження згідно галузевого стандарту СОУ-Н10.1.00174125.002:2012. «Порядок і організація обстеження залізобетонних копрів» [9].

Цей стандарт розроблено і впроваджено на вугільних шахтах України ДП «Інститут «УкрНДІпроект».

Висновки

Для забезпечення надійності і безпечної експлуатації залізобетонних шахтних копрів в ДП «Інститут «УкрНДІпроект» розроблено і впроваджено на вугільних шахтах України галуzeвий стандарт СОУ-Н10.1.00174125.002:2012. «Порядок і організація обстеження залізобетонних копрів».

Застосування вищевказаного стандарту забезпечує:

- введення системного обстеження і паспортизації залізобетонних копрів;
- підвищення безпеки експлуатації конструкцій копрів за рахунок своєчасного одержання інформації про фактичний стан їх несучих елементів.

Впровадження на шахтах цього стандарту дозволяє:

- оцінювати термін безпечної експлуатації несучих конструкцій залізобетонних копрів;
- визначити елементи несучих конструкцій, які потребують ремонту, реконструкції або заміни;
- прогнозувати залишковий ресурс елементів несучих конструкцій для подовження терміну їх безпечної експлуатації;
- на підставі одержаних результатів обстеження визначити перелік та значення показників на-

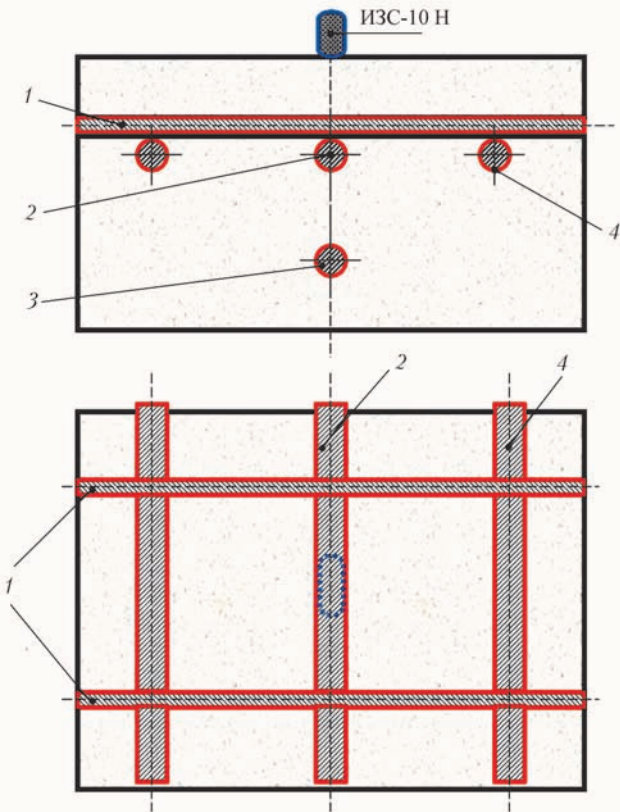


Рис. 3. Визначення характеристик армування залізобетону для схеми перехресного армування конструкції: 1 – поперечний стрижень арматури; 2 – поздовжній арматурний стрижень, для якого визначають товщину захисного шару бетону; 3 – поздовжній арматурний стрижень другого ряду арматури; 4 – сусідні поздовжні стрижні арматури першого ряду арматури



дійності елементів несучих конструкцій з урахуванням відмов;

– визначити конструктивні, технологічні та експлуатаційні обмеження, що забезпечують розрахунковий термін служби конструкцій при обслуговуванні їх згідно з фактичним станом.

#### Список літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 26.05.04 № 687. *Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної безпеки.*
2. НПАОП 45.2-1.01-98. *Правила обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель і споруд.*
3. ДСТУ БВ.2.7-220:2009. *Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю.*
4. ДСТУ БВ.2.7-226:2009. *Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності.*
5. ДСТУ БВ.2.7-214:2009. *Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.*
6. Куліш В. А., Крилов Е. С. (2018) Контроль і оцінка технічного стану металевих конструкцій будівель і споруд шахтної поверхні. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 47–52.
7. ДБНВ.3.1-1-2002. *Ремонт и усиление несущих и ограждающих строительных конструкций и оснований промышленных зданий и сооружений. (Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ промислових будівель і споруд).*
8. ДСТУ НБВ.1.2-18:2016. *Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану.*
9. СОУ-Н10.1.00174125.002:2012. *Порядок і організація обстеження залізобетонних копрів. Стандарт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України.*

#### References

1. (2004) Regulations of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 26.05.04, No. 687: *Procedure for conducting inspection, testing and/or expertise examination (technical diagnostics) of high-risk machinery, mechanisms and equipment* [in Ukrainian].
2. NPAOP 45.2-1.01-98: *Guidelines for examination, evaluation of technical condition and certification of industrial buildings and constructions* [in Ukrainian].
3. DSTU BV.2.7-220:2009: *Building materials. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of nondestructive testing* [in Ukrainian].
4. DSTU BV.2.7-226:2009: *Concretes. Ultrasonic method of strength determination* [in Ukrainian].
5. DSTU BV.2.7-214:2009: *Building materials. Concretes. Methods of strength determination by reference samples* [in Ukrainian].
6. Kulish, V.A., Krylov, E.S. (2018) Monitoring and assessment of the technical condition of metals structures of buildings and constructions of mine surface. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 47-52 [in Russian].
7. DBNV.3.1-2002: *Repair and reinforcement of load-carrying and enclosing building constructions and foundations of industrial buildings and constructions* [in Ukrainian].
8. DSTU NBV.1.2-18:2016: *Guidelines on inspection of buildings and constructions to determine and assess their technical condition* [in Ukrainian].

9. SOU-N10.1.00174125.002:2012: *Sequence and organization of examination of reinforced concrete pile drivers. Standard of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine* [in Ukrainian].

#### ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ШАХТНЫХ КОПРОВ

В. А. КУЛИШ, Е. С. КРЫЛОВ

ГП «Институт» УкрНИИпроект» Минэнергоугля Украины.  
03142, г. Киев, просп. Академика Палладина, 46/2.  
E-mail: post.unp@ukr.net

Разработан стандарт Минэнергоугля Украины СО-У-Н10.1.00174125.002 2012 «Порядок и организация обследования железобетонных копров», который регламентирует процедуры контроля и оценки технического состояния несущих конструкций и учитывает специфику инструментальных обследований железобетонных изделий с использованием современных методов и средств неразрушающего контроля. Он отвечает требованиям действующих законодательных и нормативных документов и способствует повышению безопасности и надежности эксплуатации объектов повышенной опасности за счет своевременного получения информации о фактическом техническом состоянии штатных копров. Библиогр. 9, табл. 5, рис. 3.

Ключевые слова: контроль, техническое состояние, копер, железобетонная конструкция, инструментальное обследование, дефект, повреждение, надежность, безопасность

#### FEATURES OF MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF LOAD-CARRYING STRUCTURES OF CONCRETE SHAFT HEADGEARS

V.A. KULISH, E.S. KRYLOV

SC «UkrNDIproekt» Institute of the Ministry of Energy and Coal Industry» 46/2 Akademik Palladin Prosp., 03142, Kyiv.  
E-mail: post.unp@ukr.net

A standard of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine SOU-N10.1.00174125.002:2012 ‘Sequence and organization of examination of concrete headgears’ was developed, which specifies the procedures of examination and evaluation of the technical condition of load-carrying structures and takes into account the specifics of instrumental examination of concrete products using modern NDT methods and means. The standard meets the requirements of the currently valid legal and normative documents and promotes improvement of safety and reliability of operation of higher risk facilities due to timely acquisition of information on the actual technical condition of shaft headgears. 9 Ref., 5 Tabl., 3 Fig.

Keywords: monitoring, technical condition, headgear, concrete structure, instrumental examination, defect, damage, reliability, safety

Надійшла до редакції 23.10.2018

## ДРУГА КОНФЕРЕНЦІЯ «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ В КОНТЕКСТІ АСОЦІЙОВАНОГО ЧЛЕНСТВА УКРАЇНИ В ЄС»

15–19 жовтня 2018 р. Українське товариство з неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) за ініціативою та підтримкою навчального центру підприємства «ДП-Тест», директор Павлій О. В., та кафедри приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ»), завідувач проф. Протасов А. Г., провели в польському курортному містечку Наленчув Люблінського воєводства другу науково-технічну конференцію з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі» Про першу таку конференцію ми писали в журналі «ТДНК» № 4, 2017 р.

На першому засіданні після низки привітань виступили з доповідями організатори конференції. Про розробки засобів неруйнівного контролю НВФ «Ультракон» розповів її директор Павлій І.В. В творчому доробку цього колективу є дефектоскопи ультразвукові, вихрострумові, магнітні, електроіскрові, акустоемісійні, товщиноміри, твердоміри і т. п. Акцент в його виступі був зроблений на новій розробці – ультразвуковому дефектоскопі УД2-50. Про нові розробки та традиційні продукти компаній-партнерів «Наукововиробничої фірми «Діагностичні прилади» розповів керівник Павлій О. В. «Діагностичні прилади» співпрацює з такими лідерами галузі, як OLYMPUS IMS, MR-Chemie, Teledyn ICM, Carestream Health, Ernst, Galdabini, Parker-NDT, Spectronics, Protec-MED, та ін.

У рамках конференції відбулися три семінари, близькі за тематикою та пов'язані з загальним спрямуванням конференції.

Перший семінар був присвячений європейському технічному законодавству та нормативним вимогам у сфері неруйнівного контролю. Його модератором та доповідачем був проф. Александр Скордев з Болгарії (PhD, MEngFh, Senior Researcher, NDT Level 3 UT+RT, Ass. Professor, Expert EU technical legislation, NDT auditor). Він зупинився на цілому ряді актуальних питань європейського технічного законодавства:

- основні принципи та види європейського технічного законодавства;
- директиви Європейського Союзу;
- директиви Нового підходу та неруйнівний контроль;

- система менеджменту якості ISO 9000:2015;
- оцінка відповідності ISO IEC 17000:2012;
- європейська стандартизація в неруйнівному контролі;
- неруйнівний контроль і Директива 2014/68/ЕС «Об'єкти, що працюють під тиском» та Директива 2014/29/ЕС «Прості посудини, що працюють під тиском»;
- вимоги до випробувальних лабораторій;
- незалежність і неупередженість в системі неруйнівних випробувань;
- якість неруйнівного контролю та його інструментарій;
- характеристика індикацій – основний процес в неруйнівному контролі;
- регуляція калібрування технічних засобів в неруйнівному контролі;
- атестація методів і процедур неруйнівного контролю;
- навчання, атестація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю.

Темою другого семінару було становлення системи стандартизації і сертифікації в галузі неруйнівного контролю в Україні. Цю тему обговорили кілька виступаючих.

Важливу інформацію виклала в своїх доповідях Щупак С. О., керівник групи ІЕЗ ім. Є. О. Патона, відповідальний секретар Технічного комітету із стандартизації (ТК-78) «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»:

- Система стандартизації в області неруйнівного контролю та гармонізація національної системи з Європейською.
- Поточний стан міжнародної стандартизації в області кваліфікації і сертифікації персоналу з неруйнівного контролю. Результати засідання ISO/TC 135 SC 7 «Кваліфікація персоналу».
- Система сертифікації персоналу з неруйнівного контролю SNT-TC-1A.

Дві аналітичні доповіді представив на суд слухачів Хорло М. Ф., директор АЦНК ПрАТ ВТП «Укренергочормет» з Харкова:

- Критерії приймання зварних з'єднань за результатами ультразвукового контролю.
- Порівняльний аналіз вимог національних і міжнародних стандартів з сертифікації персоналу. Досвідом роботи ОСП «Євростандарт» поділилася Лукьянова Л. Г. (м. Запоріжжя).

В третьому блоці доповідей конференції розглянуто питання, що пов'язані з системою оцінки

відповідності в Україні та вимогами до випробувальних лабораторій.

Лаврентьева М. М., генеральний директор «Глобал Сертифік Дніпро», провідний аудитор з сертифікації систем менеджменту виступила з доповіддю «Управління ризиками в рамках функціонування системи управління лабораторією по ISO/IEK 17025:2017».

Сазонов П. А., керівник відділу калібровки засобів неруйнівного контролю ДП «Дніпростандартметрологія», розповів про державне регулювання метрологічного забезпечення в сфері неруйнівного контролю.

Якубович І. П., провідний інженер ПП «ДП-Тест», поділився власним досвідом з акредитації випробувальної лабораторії підприємства в системі НААУ.

Дві наукові доповіді презентував д-р техн. наук Учанін В. М., провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка (м. Львів):

- Шляхи підвищення продуктивності вихрострумового контролю.
- Новий спосіб отримання міри механічних напружень.

Слід відзначити, що Учанін В. М. став в 2018 р. лауреатом Державної премії України в галузі на-

уки і техніки за широке впровадження вихрострумового контролю в авіації.

З короткими повідомленнями про роботу своїх колективів виступили проф. Протасов А. Г., завідувач кафедри приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ», та доктор наук Темурі Рігішвілі, директор НВФ «Совбі», президент Грузинського товариства неруйнівного контролю та діагностики.

Новий формат конференції у вигляді тематичних семінарів дав можливість зупинитися на обговоренні питань нормативного забезпечення в сфері НК та практичного виконання вимог міжнародних стандартів.

Чудові умови для роботи та проживання забезпечив персонал Центру навчання та відпочинку «Енергетик» в Наленчуві. Зручні конференц-зали, їх медійне забезпечення та оперативність персоналу Центру забезпечило успішну реалізацію нашої програми конференції, а комфортні зони відпочинку та затишні прилеглі приміщення сприяли неформальному спілкуванню в кулуарах.

Цікавою була і позаконференційна програма. Учасники конференції здійснили дві екскурсії: в місто на Віслі Казимеж-Дольні та адміністративний центр воєводства Люблін.

Посипайко Ю. М., Щупак С. О.,  
ІЕЗ ім. Є. О. Патона

## IX спеціалізована виставка



# МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

**нове місце  
проведення**

**ВЦ «Південний-ЕКСПО»**  
вул. Щирецька, 36, м. Львів

Інформаційні спонсори



Контакти

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



металорізальні верстати та оснастка

обладнання для обробки металу

ручний електроінструмент

ковальське обладнання

засоби захисту

металовироби, вироби для з'єднання та кріплення

металорізальні інструменти

слюсарний та монтажний інструмент

зварювальне обладнання

Організатор

**9 – 11  
КВІТНЯ  
2019**

**Експо  
Lviv**





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



## Программы профессиональной подготовки на 2019 г.

Шифр курса	Наименование программы		Продолжительность	Сроки проведения		
1. Повышение квалификации инженерно-технических работников						
101	Подтверждение профессиональной компетентности координаторов (руководителей) сварочных работ согласно ДСТУ ISO 14731 «Координация сварочных работ. Задачи и функции»		сертификация	3 недели (112 ч)	июнь, октябрь	
102			ресертификация	24 ч	март, июнь, ноябрь	
103	Расширение области аттестации координаторов (руководителей) сварочных работ		6 ч	апрель, ноябрь		
106	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)		подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп	
107			переаттестация	22 ч		
109	Техническое руководство работами по контактной стыковой сварке железнодорожных рельсов.		72 ч	март		
111	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)		3 недели (112 ч)	декабрь		
112	Расширение области аттестации председателей комиссий по аттестации сварщиков – экспертов УАКС (согласно НПАОП 0.00-1.16-96)		8 ч	январь, май, октябрь		
1121	Расширение полномочий экспертов УАКС на право аттестации сварщиков согласно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 ч	по мере комплектования групп		
1122	Расширение полномочий экспертов УАКС на право аттестации сварщиков пластмасс согласно ДСТУ EN 13067		72 ч			
113	Подготовка и аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп		
114		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)			
115		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)			
116	Расширение области аттестации членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке (согласно НПАОП 0.00-1.16-96)		6 ч	ноябрь		
117	Расширение полномочий членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов технологических служб по сварке на право аттестации сварщиков согласно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 ч	по мере комплектования групп		
118	Расширение полномочий членов комиссий по аттестации сварщиков – специалистов по техническому контролю на право аттестации сварщиков согласно ДСТУ EN ISO 9606-1		24 ч			
119	Подтверждение полномочий (переаттестация) председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС:		20 ч	январь, апрель, май, июль, сентябрь, ноябрь		
120	Подтверждение полномочий (переаттестация) членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке	20 ч	апрель, май, июль, сентябрь		
121		специалистов по техническому контролю	16 ч	февраль, май, июль, октябрь		
122		специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	36 ч			
123		специалистов по охране труда	16 ч			
130	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки (МИС) с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	453 / 128 ч <sup>1</sup>	апрель, ноябрь		
132		Международный технолог по сварке	372 / 91 ч <sup>1</sup>			
134		Международный специалист по сварке	248 / 60 ч <sup>1</sup>			
135		Международный практик по сварке	114 ч			
136		Международный дизайнер (конструктор) по сварке	40 ч	по согласованию с МИС		
137			Международный инспектор по сварке	полного уровня	230 ч	сентябрь
140				стандартного уровня	170 ч	
139				базового уровня	115 ч	
149	специалистов, которые имеют квалификацию «Международный инженер / технолог по сварке»	76 / 78 ч				
141	Металлографические исследования металлов и сварных соединений	специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	июль		
142		переаттестация	22 ч	май, июль, сентябрь		
143	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений	специальная подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	по мере комплектования групп		
144		переаттестация	20 ч			
145	Эмиссионный спектральный анализ (стилоскопирование) металлов и сплавов	специальная подготовка и аттестация	2 недели (74 ч)		по согласованию с заказчиком	
146		переаттестация	22 ч			
151	Производство сварочных материалов: организация, технологии и системы управления качеством		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком		
152	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей					
153	Технологические процессы и обеспечение качества в авиастроении		76 ч			

<b>Тематические семинары</b> (возможно проведение на территории заказчика)			
161	Нормативно-техническая документация в сварочном производстве, состояние и перспективы	2 дня (16 ч)	март, июнь
162	Обеспечение качества сварки. Требования национальных и международных стандартов	2 дня (16 ч)	апрель, июнь, октябрь
163	Изготовление конструкций из стали согласно требований ДСТУ EN 1090	32 ч	февраль

## 2. Повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки

203	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке с присвоением квалификации «Международный практик по сварке (IWP)»	112 ч	по согласованию с заказчиком
204	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка» с присвоением квалификации «Международный специалист по сварке (IWS)»	72 ч	

## 3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации квалифицированных рабочих в области сварки и родственных технологий (с присвоением квалификации в соответствии с национальной и международной квалификационными системами)

### Курсовая подготовка СВАРЩИКОВ:

301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами (с присвоением национальной и международной квалификации)	9 недель (356 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG) (с присвоением национальной и международной квалификации)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки (с присвоением национальной и международной квалификации)	3 недели (116 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) (с присвоением национальной и международной квалификации)	7 недели (276 ч)	
306	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	3 недели (112 ч)	
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных трубопроводов)	3 недели (112 ч)	
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб) с аттестацией в соответствии с ДСТУ EN 13067	5 недель (196 ч)	

### Подготовка сварщиков по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:

310	Международный сварщик угловых швов (IFW) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	130 – 210 ч <sup>2</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
312	Международный сварщик плоских соединений (IPW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	250 – 380 ч <sup>2</sup>	
315	Международный сварщик труб (ITW) с аттестацией по EN ISO 9606-1	360 – 510 ч <sup>2</sup>	
318	Международный практик-сварщик (IWP) с аттестацией по EN ISO 9606-1	35 – 153 ч <sup>2</sup>	

### Переподготовка СВАРЩИКОВ с присвоением квалификации «Международный сварщик»: (IFW, IPW, ITW)

321	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 – 112 ч <sup>2</sup>	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
322	переподготовка сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	76 – 118 ч <sup>2</sup>	
323	переподготовка сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG) с аттестацией по ДСТУ EN ISO 9606-1	74 – 78 ч <sup>2</sup>	

### Повышение квалификации СВАРЩИКОВ:

330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, (индивидуальная подготовка по модульной технологии)
331	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах	2 недели (72 ч)	
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
333	механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	2 недели (72 ч)	
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	
335	автоматической дуговой сварки под флюсом / в защитных газах	2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	

### Курсовая подготовка контролеров неразрушающего контроля:

343	Специализация - визуально оптический контроль	72/196 ч <sup>3</sup>	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
344	Специализация – радиографический контроль	72/196 ч <sup>3</sup>	
345	Специализация – ультразвуковой контроль	72/196 ч <sup>3</sup>	
346	Специализация – магнитопорошковый контроль	72/196 ч <sup>3</sup>	
347	Специализация – капиллярный контроль	72/196 ч <sup>3</sup>	

### Целевая подготовка и подтверждение квалификации:

362	Персонала, занимающегося нанесением защитных покрытий	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)	по согласованию с заказчиком
363		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)	
364		детонационным напылением	3 недели (112 ч)	
365		плазменным напылением	3 недели (112 ч)	

366	специалистов по поверхностной закалке колесных пар на установке высокотемпературной закалки УВПЗ - 2М»	72 ч	по согласованию с заказчиком
367	сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах выполняющих наплавку острых, крестовин стрелочных переходов железнодорожных путей с аттестацией согласно СОУ 35.2-00017584-030-1:2009	5 недель (194 часа)	

#### 4. Аттестация персонала сварочного производства

400	Аттестация координаторов (руководителей) сварочных работ в соответствии с ДСТУ ISO 14731		8 ч	проводится по окончании курсов 101-109
401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с правилами НПАОП 0.00-1.16-96 и стандартами ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5, ДСТУ ISO14732		72 ч	постоянно
402	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно с НПАОП 0.00-1.16-96		24 ч	
403	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с НПАОП 0.00-1.16-96, ДСТУ EN ISO 9606-1,2,3,4,5		32 ч	
405	Специальная подготовка и аттестация сварщиков авиационной промышленности в соответствии с ДСТУ ISO 24394		72 ч	
406, 457	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (европейскими) стандартами EN ISO 9606-1		24 ч	
407	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматической сварки плавлением в соответствии с стандартом ДСТУ ISO 14732		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком
411	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)	
412	Периодическая аттестация сварщиков на допуск к выполнению сварочных работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч	
413	Специальная подготовка и аттестация операторов-сварщиков контактно-стыковой сварки рельсов в соответствии с ДСТУ ISO 14732 и СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		2 недели (72 ч)	проводится по окончании курса 308
414	Аттестация сварщиков пластмасс в соответствии с ДСТУ EN 13067 (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)			проводится по окончании курса 309
415	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб) в соответствии с ДСТУ EN 13067		32 ч	ежеквартально
421	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно ДСТУ EN 9712	ультразвуковой контроль	32 / 36 / 64 (I yr) ч <sup>4</sup>	индивидуальная подготовка по согласованию с заказчиком
423			40 / 48 / 72 / 80 / 144 (II yr) ч <sup>4</sup>	
427		радиографический контроль	36 / 40 / 72 (I yr) ч <sup>4</sup>	
430			40 / 48 / 76 / 80 / 152 (II yr) ч <sup>4</sup>	
433		визуально-оптический контроль	16 / 20 / 30 (I yr) ч <sup>4</sup>	
436	20 / 24 / 35 / 40 / 70 (II yr) ч <sup>4</sup>			
448	Переаттестация сварщиков контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов согласно требованиям ДСТУ ISO 14732 и СОУ 35.2-00017584-030-1:2009		32 ч	февраль

#### 5. Тренинги, тестирование и подтверждение квалификации

501	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков механизированной дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG)	4 – 12 ч <sup>5</sup>	по согласованию с заказчиком
502	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (TIG)	4 – 12 ч <sup>5</sup>	
503	Профессиональное тестирование и подтверждение квалификации сварщиков ручной дуговой сварки покрытыми электродами (MMA)	4 – 16 ч <sup>5</sup>	
512	Практические тренинги по различным способам сварки	8 – 32 ч <sup>5</sup>	

<sup>1</sup> - Продолжительность обучения определяется в зависимости от базовой профессиональной подготовки и опыта работы в сварочном производстве.

<sup>2</sup> - Продолжительность обучения зависит от специализации.

<sup>3</sup> - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

<sup>4</sup> - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

<sup>5</sup> - Длительность программы зависит от условий и характера испытаний.

- По согласованию с Заказчиками возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень.
- На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет.
- Стоимость обучения определяется при заключении договора.
- Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

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





# 6th INTERNATIONAL CONFERENCE FRACTURE MECHANICS OF MATERIALS AND STRUCTURAL INTEGRITY

Lviv, Ukraine, June 3-6, 2019

## CONFERENCE TOPICS

- Fundamentals, physics and mechanisms of fracture and fatigue
- Experimental fracture mechanics
- Computational fracture mechanics
- Solids mechanics
- Advanced technologies (additive manufacturing, laser manufacturing, nanostructurisation, etc.): design, mechanics, fatigue and fracture
- Environmentally (corrosion, hydrogen, irradiation etc.) assisted degradation and cracking
- Failure analysis and case studies
- Structural integrity
- Damage tolerance and risk analysis
- Durability, safety, reliability and life extension of components
- Non-destructive evaluation and structural health monitoring
- Advanced technologies for repair of damaged objects
- Other aspects of fracture mechanics Special sessions and round tables devoted to actual problems are going to be organized in the frame of the Conference.

## IMPORTANT DATES

- Abstract submission: March 1, 2019
- Abstract notification of acceptance: March 15, 2019
- Conference fee payment: April 15, 2019
- Papers submission: May 1, 2019

## CONFERENCE MATERIALS PUBLICATION

Abstracts will be published in a book of abstracts and will be available during the registration.

All the accepted papers, after being reviewed, will be published in an issue of Procedia Structural Integrity (Elsevier), which will be indexed in the Scopus citation database. Conference fee covers publication of one paper.

## CONTACT INFORMATION (ORGANIZING COMMITTEE)

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine  
5 Naukova St., Lviv 79060, Ukraine

Tel: +380 32 263 21 33 (Chairman); +380 32 229 62 94 (Secretary)

Fax: +380 32 264 94 27

The Conference will be held in Lviv Polytechnic National University  
(12 Bandery St., Lviv 79013, Ukraine).

E-mail: [conference.fmsi2019@gmail.com](mailto:conference.fmsi2019@gmail.com) | Web-site: <http://fmsi2019.ipm.lviv.ua>



## ПОДПИСКА — 2019

### на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Зарубежные страны	
на полугодие	на год	на полугодие	на год
<b>330 грн.</b>	<b>660 грн.</b>	<b>30 евро</b>	<b>60 евро</b>

В стоимость включена доставка заказной бандеролью



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

Подписка на электронную версию журнала  
**«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»**  
на сайте: [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com).

Правила для авторов: [www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules)

Лицензионное соглашение: [www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license)

В 2019 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2017 гг.

## РЕКЛАМА в журнале

### «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

**Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров**

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

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации. Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0

- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

#### **Стоимость рекламы и оплата**

- Цена договорная

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

- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

- Публикуется только профильная реклама (техническая диагностика и неразрушающий контроль)

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

#### **Контакты:**

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

Подписано к печати 11.12.2018. Формат 60x84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24  
Печать ООО «ДИА».  
03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.