

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

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Главный редактор

**Б. Е. ПАТОН**

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

**А. А. Лебедев, В. А. Стрыжало**

(Ин-т проблем прочности, Киев, Украина)

**Н. П. Алешин**

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

**В. Л. Венгринович**

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

**М. Л. Казакевич**

Ин-т физической химии, Киев, Украина

**О. М. Карпаш**

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

**В. В. Ключев**

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

**З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин**

(Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина)

**Н. В. Новиков**

Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина

**Г. И. Проколенко**

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

**В. А. Стороженко**

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

**С. К. Фомичов**

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

**М. Г. Чаусов**

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

**В. Е. Щербинин**

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

**Адрес редакции**

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

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

**Научные редакторы**

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

**Редакторы**

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

**Свидетельство**

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

- ПАТОН Б. Е.** Исследования и разработки  
ИЭС им. Е. О. Патона для современной энергетики..... 3
- НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., БОЙЧУК О. И.**  
Влияние локального скопления дефектов на  
распространение акустических волн в пластинах.  
Сообщение 2. .... 12
- ТРОИЦКИЙ В. А.** Подвижное локальное намагничивание  
металлоконструкции при магнитопорошковом контроле ..... 16
- ДМИТРИЕНКО Р. И., ГАРФ Э. Ф., ЧИЖИЧЕНКО В. П.**  
Остаточное расширение баллонов (Краткий обзор) ..... 23
- ВОРОНКИН Е. Ф.** Сцинтилляционные экраны на основе  
селенида цинка и оксидных сцинтилляторов для нераз-  
рушающего контроля ..... 29
- ОКСЕНЬ Д. Е., ОКСЕНЬ Е. И.** Исследование особенно-  
стей виброакустического поля двигателя внутреннего  
сгорания с дефектами в кинематических парах ..... 35

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

- КУЛИШ В. А., КРЫЛОВ Э С., ДРОЗДОВ А. В.**  
Акустико-эмиссионная диагностика секций шахтных  
крепей в процессе их прочностных испытаний..... 39
- МАКСИМОВ А. Б.** Неразрушающий контроль качества  
метизов с помощью коэрцитиметра «СИЛА»..... 45
- ШЕВЧЕНКО А. И., ОВСИЕНКО М. А., ХАРЧЕНКО Л. Ф.**  
Спектральный акустико-эмиссионный метод контроля  
пластичности низколегированных сплавов хрома..... 49

**ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ**

- Оценка усталостного и напряженно-деформированного  
состояния металлоконструкций и оборудования, включая  
прогноз остаточного ресурса, по измерениям магнитной  
характеристики – коэрцитивной силы ..... 55
- Основы технологий теплового контроля для проведения  
инструментального энергоаудита..... 59
- Международная конференция «Сварка и родственные  
технологии – настоящее и будущее» ..... 62
- Календарь выставок и конференций по НК в 2014 г. .... 68

**ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:**

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

**EDITORIAL BOARD**

**Editor-in-Chief**  
**B. E. PATON**

**E. F. Garf, E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko,**  
**L. M. Lobanov, Z. A. Maidan** (Executive Secretary)  
**A. Ya. Nedoseka** (Deputy Editor-in-Chief),

**Yu. N. Posypaiko,**  
**V. A. Troitskii** (Deputy Editor-in-Chief),  
**E. V. Shapovalov**

(PWI of the NASU, Kiev, Ukraine)  
**A. A. Lebedev, V. A. Stryzhalo**  
 (Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Address**

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

**Scientific editors**

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

**Editors**

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

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

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

**CONTENTS**

**SCIENTIFIC-TECHNICAL**

**PATON B. E.** PWI investigations and developments for modern power engineering ..... 3

**NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., BOICHUK O. I.** Influence of local defect accumulation on acoustic wave propagation in plates. Information 2..... 12

**TROITSKII V. A.** Mobile local magnetization of metal structures at magnetic particle inspection..... 16

**DMITRIENKO R. I., GARF E. F., CHIZHICHENKO V.P.** Residual expansion of cylinders (Brief review) ..... 23

**VORONIN E. F.** Scintillation screens based on zinc selenide and oxide scintillators for NDT ..... 29

**OKSEN D. E., OKSEN E. I.** Investigation of the features of vibroacoustic field of internal combustion engine with defects in kinematic pairs ..... 35

**INDUSTRIAL**

**KULISH V. A., KRYLOV E. S., DROZDOV A. V.** Acoustic-emission diagnostics of sections of shaft lining during their strength testing. .... 39

**MAKSIMOV A. B.** Non-destructive testing of quality of metal products using «SILA» coercive force meter ..... 45

**SHEVCHENKO A. I., OVSIENKO M. A., KHARCHENKO L. F.** Spectral acoustic-emission method of monitoring the ductility of low-alloyed chromium alloys ..... 49

**NEWS AND INFORMATION**

Assessment of fatigue and stress-strain state of metal structures and equipment, including residual life prediction, by measurements of magnetic characteristic – coercive force ..... 55

Fundamentals of thermal examination technologies for performance of instrumental energy audit ..... 59

International Conference «Welding and related technologies – present and future» ..... 62

Schedule of NDT exhibitions and conferences in 2014 ..... 68

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:  
 Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics  
 and Non-Destructive Testing» TC-78  
 Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic



## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ\*

**Б. Е. ПАТОН**

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлен ряд разработок ИЭС им. Е. О. Патона для энергетики, в частности, технологии сварки крупногабаритных роторов турбин, электронно-лучевой сварки заготовок большой толщины из высокопрочных сталей, технологии сварки под флюсом и контактной сварки пульсирующим оплавлением труб для магистральных газопроводов большого диаметра, технология и оборудование для создания энергосберегающих теплообменных устройств. Отмечены разработки, направленные на повышение коррозионной стойкости твэлов и безопасной эксплуатации АЭС благодаря применению жаропрочной износостойкой механизированной наплавки коррозионностойкими сплавами трубопроводной арматуры. Представлены практические рекомендации по ремонту магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. Выполнены исследования, показавшие возможность применения акустической эмиссии для мониторинга сварных конструкций, работающих при высоких температурах. Разработан способ для предотвращения катастрофического вытекания нефти из разрушенных труб скважин нефтедобывающих платформ. Рис. 20.

*Ключевые слова:* сварка под флюсом, контактная сварка пульсирующим оплавлением, электронно-лучевая сварка, защитные покрытия твэлов, оребренные плоскоовальные трубы, ультразвуковой контроль сварных швов, акустическая эмиссия, износостойкая наплавка, техническая диагностика

Развитие энергетики во многом определяет масштабы и темпы роста мировой экономики. По самым осторожным оценкам, в XXI в. общее энергопотребление на планете удвоится. Наиболее интенсивно будет расти производство электроэнергии (рис. 1), которое к 2030 г. достигнет 40 % мирового спроса на энергоресурсы. Уголь, нефть и газ останутся главным источником энергии в ближайшие десятилетия. Однако их месторождения исчерпываются, а разведка новых требует значительных инвестиций. При этом экологические последствия от использования ископаемого топлива становятся все больше угрожающими: атмосферные выбросы ведут не только к загрязнению окружающей среды и ухудшению здоровья населения, но и к глобальным изменениям климата.

Сегодня усилия мирового сообщества направлены на:

- повышение эффективности энергопотребления;

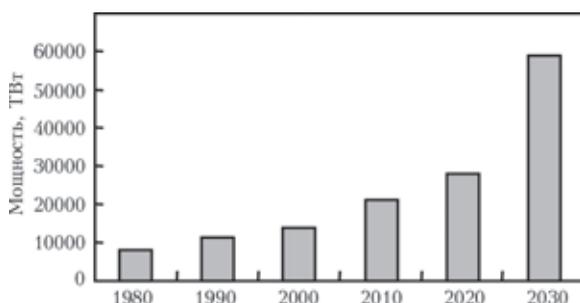


Рис. 1. Рост мирового производства электроэнергии

- развитие экономически обоснованных источников энергии;
- снижение вредных выбросов с помощью применения новых технологий и более экологичных видов топлива, таких как природный газ, атомная энергия и возобновляемые источники. Решение этих сложных задач, направленных на создание энергетики будущего, более чем когда-либо зависит от результатов научных исследований, их быстро и эффективно использования.

Весомый вклад в создание энергоэффективных, экологически чистых технологий и продуктов вносят ученые и специалисты-сварщики. Современное сварочное производство является

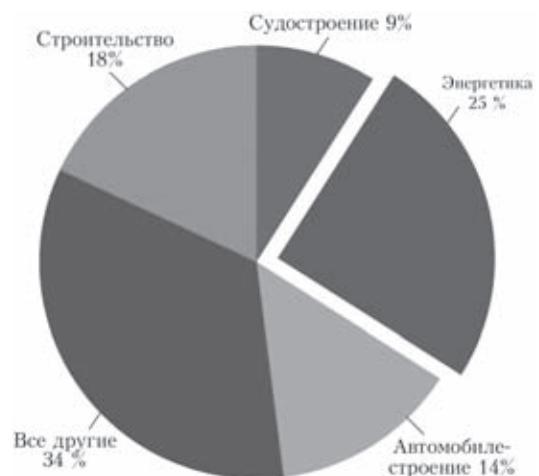


Рис. 2. Рынок сварочной техники по состоянию на 2011-2012 гг.

\* Доклад представлен на Международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее», 25–26 ноября 2013 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

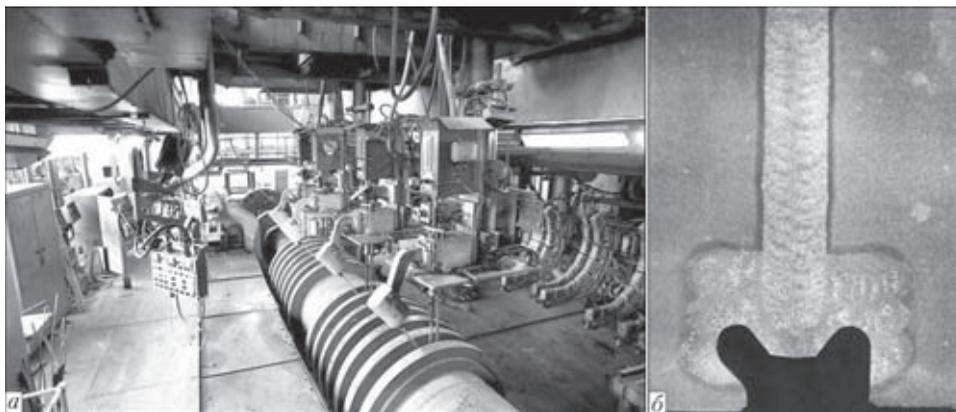


Рис. 3. Автоматическая сварка под флюсом ротора паровой турбины мощностью 1000 МВт для АЭС (а) и макрошлиф металла сварного шва ротора паровой турбины (б)

одной из наукоемких, межотраслевых составляющих мировой экономики. В развитых странах с применением сварочных технологий производится более половины национального валового продукта. Рынок сварочной техники, несмотря на кратковременные спады в период мировых кризисов, продолжает уверенно расти. В 2012 г. объем мирового рынка сварочной техники составил 17 млрд дол. США и, по оценке экспертов, в ближайшие пять лет возрастет до 22 млрд дол. США. Наибольшую его долю составляет рынок сварочной техники в энергетике (рис. 2). Прогнозируется, что в ближайшие три года он увеличится на 30 %.

Сегодня имеется мощный арсенал технологий, которые позволяют получать неразъемные соединения различных конструкционных и функциональных материалов. Сварочные технологии дают возможность создавать уникальные конструкции энергетического оборудования — турбин, энергетических котлов, корпусов реакторов АЭС и др.

Институт электросварки им. Е.О. Патона выполняет большой комплекс работ в области сварки и родственных технологий для энергетической отрасли. Применительно к турбостроению разработана и внедрена в производство технология и специализированное оборудование для сборки и автоматической сварки под флюсом в узкую разделку крупногабаритных роторов мощных паровых турбин для тепловых и атомных электростанций на одном сборочно-сварочном стенде. При этом роторы цилиндров низкого и среднего давления изготавливаются из отдельных дисков, что исключает достаточно сложную проблему получения крупногабаритных тяжелых цельнокованых заготовок для роторов массой до 200 т и длиной более 10 м. Установка сборки и сварки укомплектована четырьмя аппаратами для автоматической сварки под флюсом с программным управлением процесса раскладки валиков в узкой разделке и системой слежения электрода за дном и стенками разделки кромок (рис. 3).

Для производства изделий энергетического машиностроения необходимо сваривать заготовки из

высокопрочной стали большой толщины. Весьма эффективна для этого электронно-лучевая сварка (ЭЛС), которая обеспечивает высокую производительность сварочного процесса, высокое качество соединений и минимальные деформации. В ИЭС им. Е. О. Патона выполнены исследования и разработки по созданию технологий и оборудования для ЭЛС конструкционных сталей толщиной до 210 мм (рис. 4). Стабильное формирование сварных соединений и предотвращение дефектов в металле глубоких швов достигается с помощью развертки луча с его параллельным переносом вдоль и поперек направления сварки.

Задача получения сварных соединений высоко качества значительно усложняется на участке замыкания кольцевого шва, где возникают корне-

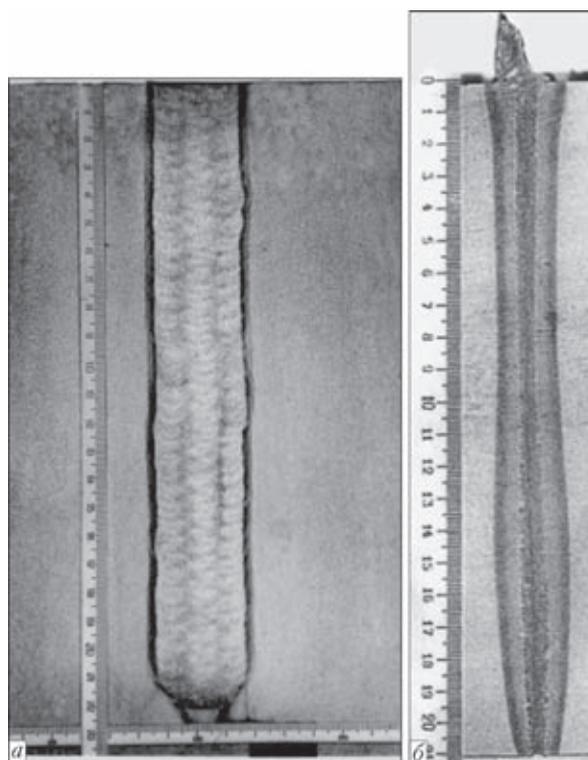


Рис. 4. Макрошлифы поперечного сечения кольцевых швов низколегированной стали большой толщины, выполненных многослойной дуговой сваркой под флюсом (а) и однопроходной ЭЛС (б)

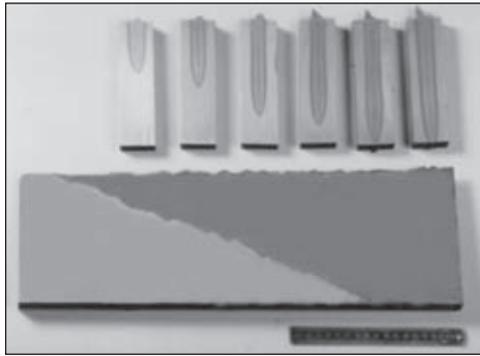


Рис. 5. Макрошлифы участка замыкания кольцевого шва при ЭЛС стали 15X2НМФА толщиной 150 мм

вые дефекты. Она решена с помощью применения развертки луча, фокусировки пучка в плоскости на 10 мм выше середины шва и наклона плоскости стыка и сварочного пучка на угол  $10^\circ$  относительно горизонта. На рис. 5 хорошо видно качественное формирование закругления в корне шва и полное отсутствие дефектов.

Созданы новое поколение крупногабаритных вакуумных камер, технологии их сборки и ЭЛС (рис. 6). Основной отличительной чертой этих камер является использование двух вакуумно-плотных и прочных оболочек, соединенных между собой ребрами жесткости. Высокая геометрическая точность стенок камеры обеспечивает новые возможности построения высокоточных манипуляторов пушки и изделия. Для управления манипуляторами и всем процессом сварки разработано

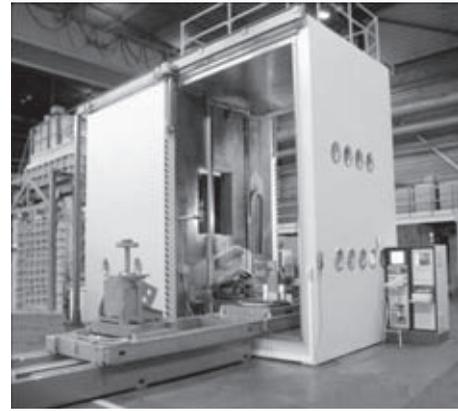


Рис. 6. Оборудование ЭЛС, изготавливаемое в ИЭС им. Е. О. Патона

программное обеспечение с удобным графическим интерфейсом оператора.

Разработанная технология ЭЛС высокопрочных сталей большой толщины имеет перспективы применения при изготовлении корпусов реакторов АЭС. Как показывает практика, продолжительность дуговой сварки кольцевых швов в корпусе реактора составляет сотни часов, тогда как ЭЛС такого шва — нескольких часов. Принципиальная схема предлагаемой промышленной установки для сварки кольцевых швов корпуса реактора ВВР-1000 показана на рис. 7.

Развитие атомной энергетики неразрывно связано с повышением безопасности атомных реакторов и снижением затрат на их эксплуатацию.

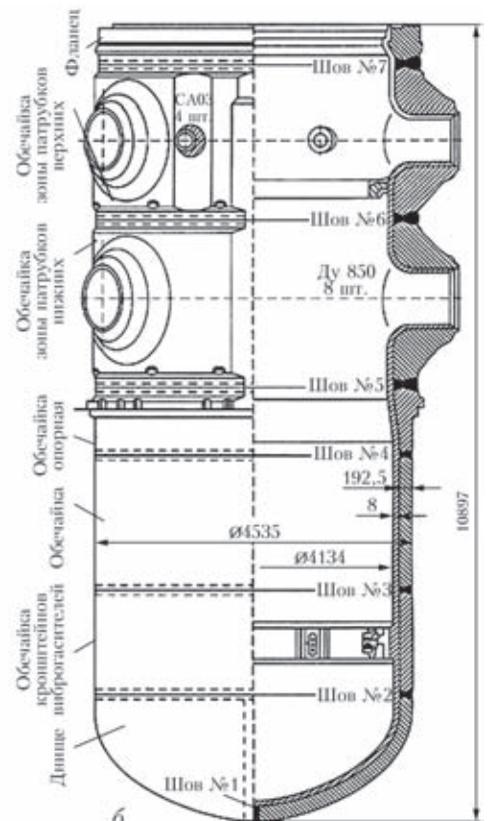
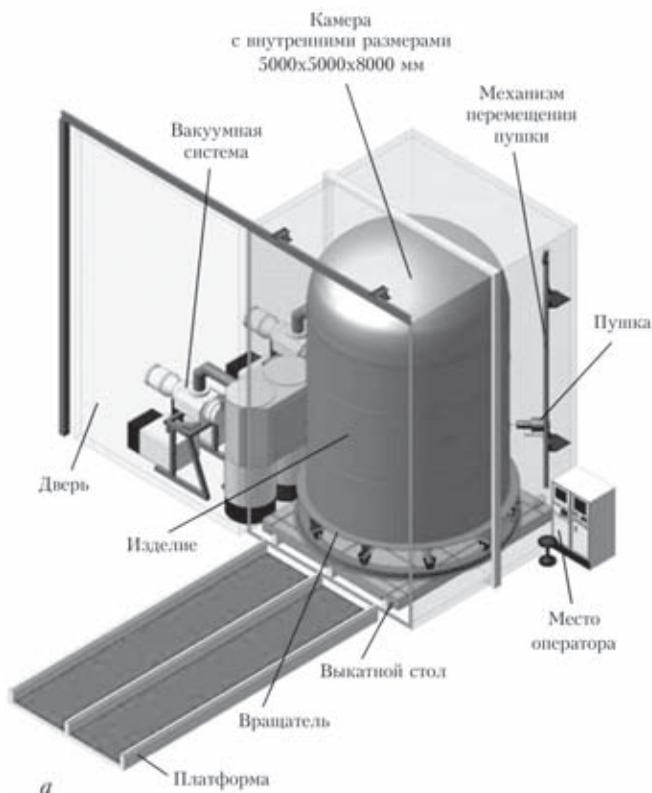


Рис. 7. Принципиальная схема промышленной установки для ЭЛС кольцевых швов корпуса реактора ВВР-1000 (а) и схема корпуса реактора (б)

Причиной аварийной ситуации на атомной станции Фукусима-1 стало химическое взаимодействие циркониевых оболочек твэлов с паром. Пароциркониевая реакция привела к генерации водорода, вследствие чего и произошел взрыв. Одним из путей снижения затрат на эксплуатацию АЭС является увеличение цикла перезагрузки ядерного топлива, что также требует повышения коррозионной стойкости циркониевых сплавов в воде в штатном режиме работы реактора. Поэтому разработка методов и технологии изготовления твэлов, обеспечивающих повышение коррозионной стойкости циркониевых оболочек в воде и паре в штатном и аварийном режимах работы реактора, является актуальной.

Одним из путей решения этой задачи является создание на поверхности циркониевой оболочки твэлов защитных покрытий, которые должны обеспечить ей более длительный срок эксплуатации в штатном режиме, а в случае аварийной ситуации существенно снизить вероятность возникновения пароциркониевой реакции.

Для решения поставленной задачи были проведены исследования, направленные на разработку метода осаждения толстых покрытий на основе карбида кремния на циркониевые оболочки твэлов. Предлагаемый метод основан на использовании разработанного в институте высокоскоростного электронно-лучевого осаждения толстых покрытий неорганических материалов. Использование мощных электронно-лучевых пучков в стационарном режиме позволяет испарять в вакууме с большой скоростью металлические и керамические вещества и формировать на их основе покрытия с заданной структурой. Этот метод может обеспечить осаждение покрытий на основе карбида кремния со скоростями 5...10 мкм/мин и получить покрытия на длинномерных оболочках твэлов со скоростью порядка 1 м/мин. Отличительной особенностью разработанного метода является возможность совмещения процесса осаждения покрытий с другими процессами, которые необходимы для обеспечения высокой прочности сцепления подложки и покрытия, модифицирования структуры покрытия и т. п.

Общий вид фрагментов циркониевых оболочек твэлов без покрытия и с покрытием представлен

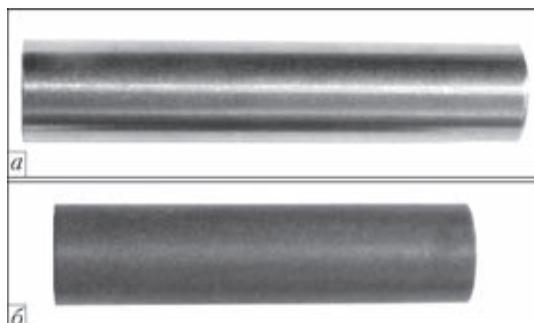


Рис. 8. Общий вид фрагментов циркониевых оболочек без покрытия (а) и с покрытием (б) на основе карбида кремния

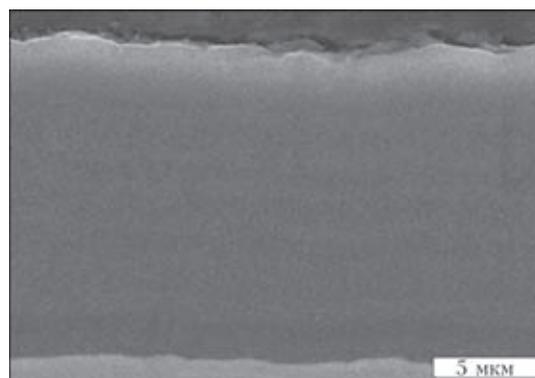


Рис. 9. Микроструктура покрытий на основе карбида кремния

на рис. 8. Разработанная методика осаждения обеспечивает получение однородного по поверхности бездефектного покрытия с малой шероховатостью и высокой адгезионной прочностью, с высокой твердостью, без дефектов как в самом покрытии, так и на границе раздела покрытие–подложка (рис. 9).

ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ВНИИНМ им. А. А. Бочвара проведены исследования коррозионной стойкости покрытий при высоких температурах (аварийный режим работы твэлов), которые показали их стойкость к окислению. Как видно из рис. 10, в процессе испытания покрытие сохраняет целостность и хорошее сцепление с подложкой, тогда как образцы без покрытия при тех же условиях испытывают интенсивную коррозию в непокрытой области циркониевого образца.

ИЭС им. Е. О. Патона совместно с Киевским политехническим институтом разработал технологию и оборудование для поперечного оребрения плоскоовальных труб способом контактной сварки и создания на их основе широкой номенклатуры энергосберегающих теплообменных устройств (рис. 11). Поперечное оребрение плоскоовальных труб способом контактной сварки имеет ряд неоспоримых преимуществ: высокую технологич-

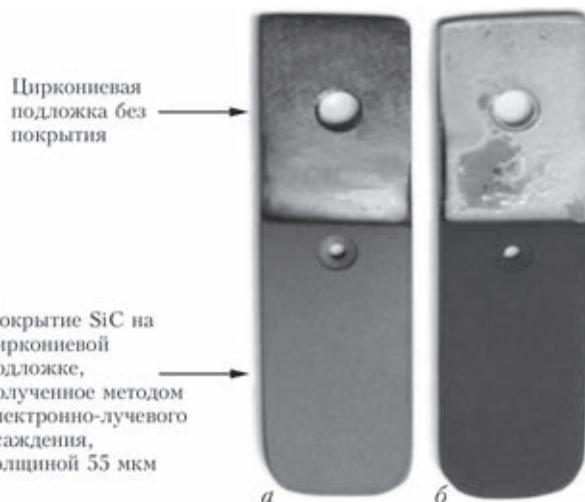


Рис. 10. Общий вид циркониевых образцов до (а) и после (б) испытания на коррозионную стойкость покрытий при высокой температуре

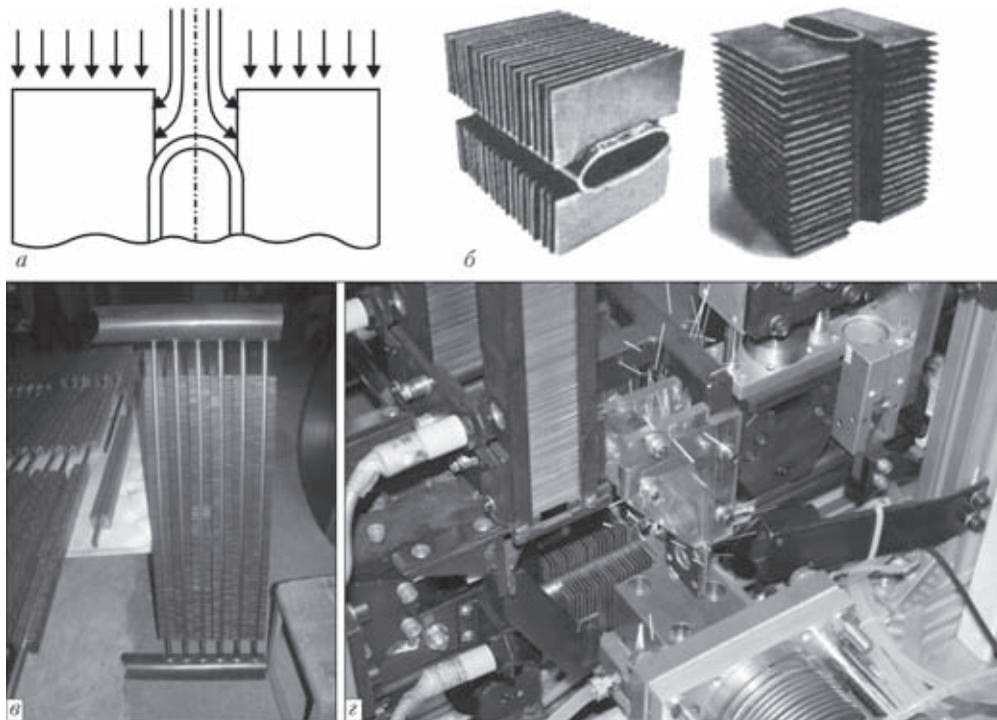


Рис. 11. Плоскоовальные трубы с поперечным оребрением для энергосберегающих теплообменных устройств: а — схема потока теплоносителя; б — элементы труб; в — секция экономайзера-утилизатора мощностью 0,2 МВт; г — автоматизированная установка для контактной сварки плоскоовальных труб

ность без применения расходуемых материалов; практически идеальный термический контакт между ребрами и трубой; высокую интенсивность конвективного теплообмена; низкое аэродинамическое сопротивление. При модернизации котлов средней и малой мощности весьма эффективным способом экономии топлива является применение экономайзеров с плоскоовальными оребренными трубами. При этом достигается большой экономический эффект.

В связи с возрастающей потребностью мировой экономики в энергоресурсах задача обеспечения надежной транспортировки углеводородного топлива из районов его добычи к основным потребителям является чрезвычайно актуальной. Несмотря на развитие альтернативных способов (перевозка сжиженного газа танкерами или компримированного газа в специальных сосудах), трубопроводный транспорт по-прежнему остается преимущественным средством доставки природного газа к потребителям.

Исследована новая многодуговая технология сварки под флюсом с комбинированным питанием дуг для улучшения качественных показателей сварных соединений за счет оптимизации фазировки дуг, режимов их горения и установочных параметров электродов. Для заводского изготовления труб разработаны 4- и 5-дуговые процессы сварки с повышенным до 1900 А током передней дуги, что позволило уменьшить размеры разделки кромок, повысить скорость сварки и снизить расходы сварочных материалов (рис. 12). Дополнительным преимуществом в этом случае является

благоприятная конфигурация линии сплавления, что улучшает результаты испытания на ударный изгиб металла сварных соединений, особенно толстостенных труб. Технология рекомендована для сварки труб с толщиной стенки от 25 до 50 мм.

При изготовлении труб с небольшой и средней толщиной стенки можно применять многодуговую сварку с электродом меньшего диаметра (3,2 мм) на первой дуге, отличающуюся глубоким проваром, достаточно благоприятным формированием швов и некоторым снижением погонной энергии.

Для обеспечения высоких показателей вязкости в институте разработана система управления химическим составом и структурой металла шва труб. Она основана на использовании многодуговой сварки под флюсом, при которой на отдельных дугах устанавливаются сварочные проволоки разного химического состава, что позволяет дозированно с большой точностью регулировать содержание легирующих элементов в металле шва в зависимости от состава применяемой трубной стали, режимов сварки и других факторов. При изготовлении труб наибольшее распространение получило сочетание агломерированного алюминатного флюса небольшой основности и сварочных проволок, содержащих марганец, молибден, или марганец, никель, молибден, или марганец, молибден, титан, бор. Требуемый химический состав шва достигается путем изменения количества дуг со сварочной проволокой той или иной системы легирования и различной скорости ее подачи на отдельных дугах. Управление химическим составом металла шва труб обеспечивает

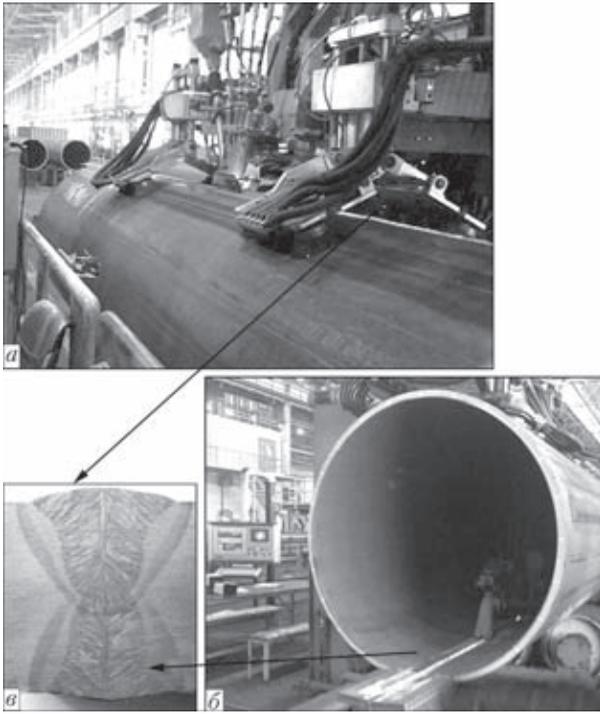


Рис. 12. Многодуговая сварка под флюсом трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 40 мм: а — 5-дуговая сварка наружного шва, скорость 110 м/ч; б — 4-дуговая сварка внутреннего шва, скорость 100 м/ч; в — макрошлиф сварного соединения трубы

получение наиболее благоприятной его структуры. На рис. 13, в показана микроструктура металла продольного шва газо- и нефтепроводной трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 25 мм из стали класса прочности К60 (категории Х70), состоящей из 85...90 % игольчатого феррита и не менее 1 % межзеренного полигонального феррита. Такая структура гарантирует высокие вязкие характеристики металла шва, например, ударную вязкость в пределах 180...200 Дж/см<sup>2</sup> на образцах с острым надрезом при температуре -30 °С.

Разработанное сочетание сварочных материалов и новые процессы многодуговой сварки под

флюсом, в том числе с повышенным током передней дуги, включая рекомендации по оптимизации режимов и установочных параметров, реализованы на различных трубосварочных заводах Украины и Российской Федерации при изготовлении труб с толщиной стенки от 16 до 40 мм из стали класса прочности К60-К65 (категории Х70-Х80) для магистральных трубопроводов.

При строительстве магистральных трубопроводов ИЭС им. Е. О. Патона совместно с организациями ОАО «Газпром» накопил большой опыт использования контактной стыковой сварки неповоротных стыков трубопроводов в полевых условиях в различных климатических зонах, в частности в районах Крайнего Севера. Комплексами «Север» (рис. 14) и другими сварочными машинами контактным способом было сварено более 70 тыс. км различных трубопроводов, в том числе больших диаметров, которые успешно эксплуатируются.

В настоящее время институт разрабатывает новый процесс контактной сварки труб, получивший название «пульсирующее оплавление» (КСО). Новизна заключается в том, что благодаря применению быстродействующих систем управления сварочной машиной и новых алгоритмов управления возможна значительная интенсификация нагрева при одинаковой установленной мощности источника электрического питания.

Процесс пульсирующего оплавления имеет ряд преимуществ по сравнению с непрерывным оплавлением. Так, режим сварки с использованием пульсирующего оплавления уменьшает время сварки кольцевого стыка по сравнению с непрерывным с 3,5...4 мин до 2 мин, а припуск на оплавление сокращается почти в 2 раза. Последнее весьма существенно, так как при этом снижаются соответственно потери металла. Благодаря использованию систем автоматического регулирования скорости оплавления удалось по-

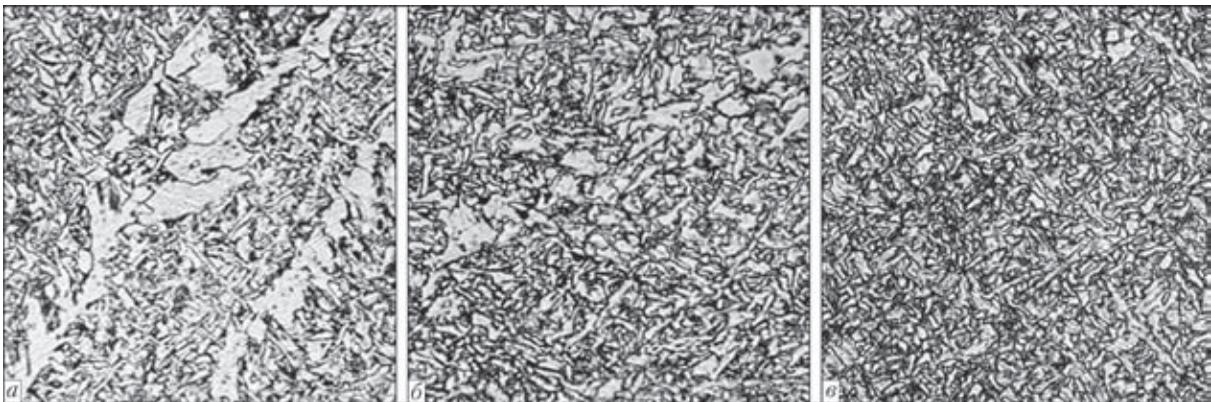


Рис. 13. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла швов труб из стали класса прочности К60, выполненных с применением различных сварочных материалов: а — Mn-Mo система легирования, кислый плавяный флюс, полигонального феррита 20...25 %; игольчатого 35...45 %;  $KV_{-30} = 27...30$  Дж/см<sup>2</sup>; б — Mn-Ni-Mo система легирования, алюминатный агломерированный флюс небольшой основности, полигонального феррита 3...5 %, игольчатого 75...80 %;  $KV_{-30} = 80...100$  Дж/см<sup>2</sup>; в — Mn-Mo-Ti-V система легирования, алюминатный агломерированный флюс небольшой основности, полигонального феррита менее 1 %, игольчатого 85...90 %;  $KV_{-30} = 180...200$  Дж/см<sup>2</sup>

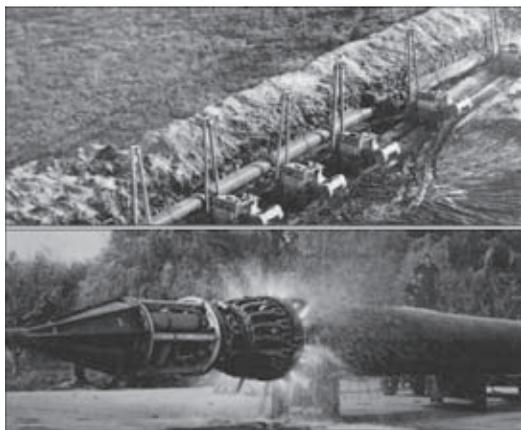


Рис. 14. Комплекс «Север» для сварки труб магистральных нефте- и газопроводов

лучить качественную сварку при меньших удельных мощностях, чем при сварке труб комплексами «Север». Поэтому при сварке труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27 мм применим источник с установленной пиковой мощностью до 1300 кВ/А.

В соответствии с требованиями международных стандартов API1104 и DNV-OS-F101 были определены механические свойства сварных соединений в состоянии после сварки и после термообработки. Так, в состоянии после сварки предъявляемым требованиям удовлетворяют показатели прочности ( $\sigma_b = 516,0 \dots 523,6$  МПа) и угол загиба ( $180^\circ$  при отсутствии трещин), а ударная вязкость ниже нормативных требований ( $KCV_{+20} = 13,3 \dots 17,1$ ;  $KCV_{-20} = 6,1 \dots 9,7$  Дж/см<sup>2</sup>) из-за наличия в зоне термического влияния крупнозернистой структуры с повышенным содержанием феррита.

Для увеличения ударной вязкости разработана технология термообработки соединений, выполненных КСО, с использованием локального индукционного нагрева после сварки. Механические свойства сварных соединений в состоянии после термообработки следующие:  $\sigma_b = 550,6 \dots 561,4$  МПа, угол загиба  $180^\circ$ ,  $KCV_{+20} = 147,9 \dots 219,5$ ,  $KCV_{-20} = 86,8 \dots 171$ , Дж/см<sup>2</sup>. Установлено, что наиболее высокие показатели ударной вязкости сварных соединений, выполненных КСО на стали класса прочности K56, могут быть получены при температурах нормализации  $950 \dots 1000$  °С и длительности нагрева в пределах  $2,5 \dots 3,0$  мин (рис. 15), а охлаждение после нагрева должно проводиться со скоростью не меньше  $8$  °С/с.

При испытаниях контрольной партии соединений, сваренных на оптимальном режиме с последующей термической обработкой, качество соединений полностью удовлетворяет требованиям стандартов.

Одновременно с разработкой технологии сварки были определены алгоритмы выявляемости дефектов соединений, выполненных КСО с исполь-

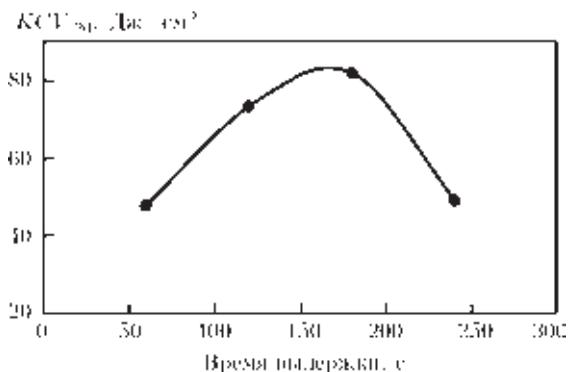


Рис. 15. Зависимость средних значений ударной вязкости от времени выдержки при температуре термической обработки  $1000$  °С

зованием средств современной ультразвуковой дефектоскопии. Разработаны также системы и алгоритмы операционного компьютеризированного контроля параметров сварки, позволяющего оценивать качество соединений сразу же после окончания сварки. При этом автоматическая система дает в печатном виде документ на каждый стык, в котором указываются реальные значения всех параметров процесса сварки, их отклонения от заданных программой значений и оценка качества соединений.

Разработана технология неразрушающего контроля кольцевых швов толстостенных труб, выполненных КСО. Технология базируется на использовании эхозеркального метода ультразвукового контроля, который реализуется с помощью преобразователей, включенных по схеме тандем.

Характерно, что дефекты при КСО расположены в одной плоскости соединения. При КСО толстостенных труб эта плоскость всегда перпендикулярна оси трубы, что облегчает локацию дефектов, при которой можно не учитывать все сигналы от структурной неоднородности металла, поступающие от участков, которые расположены за пределами плоскости соединения. Выделены две категории дефектов, которые могут быть выявлены ультразвуковым контролем: дефекты, связанные с химической неоднородностью металла, и дефекты, вызванные нарушениями режима сварки. Определены алгоритмы оценки дефектов соединений, выполненных КСО, которые гармонизированы с эталонами при ультразвуковом контроле соединений, выполненных электродуговыми способами сварки.

В результате этих исследований сертифицирована технология неразрушающего контроля соединений труб, полученных КСО, требуемая в соответствии с нормативами как обязательная операция.

В результате выполненных исследований ИЭС им. Е. О. Патона совместно с заводом «Псковэлектросвар» разработал комплекс оборудования для КСО морских трубопроводов диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм для использования на



Рис. 16. Комплекс для контактной стыковой сварки оплавлением морских трубопроводов диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм

трубоукладочной барже (рис. 16). Комплекс изготовлен и проходит испытания.

Эксплуатационная надежность работы тепловых и атомных электростанций в значительной мере зависит от герметичности и высокой износостойкости уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры. Эрозионный и коррозионный износ, трещины термической усталости, а также появление задиров на трущихся поверхностях – основные причины выхода трубопроводной арматуры из строя.

Разработаны материалы, технология и оборудование для механизированной наплавки деталей энергетической трубопроводной пароводяной арматуры высоких параметров всех типоразмеров. Широко используется наплавка жаропрочными износостойкими сплавами, что позволило существенно продлить срок службы арматуры и повысить ее надежность. Совершенствование процессов наплавки уплотнительных поверхностей арматуры будет идти по пути ее автоматизации и создания новых износостойких сплавов.

В институте разработаны практические рекомендации по ремонту сваркой магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. Они включают комплекс методик и инженерных руководств по оценке состояния магистральных трубопроводов с обнаруженными дефектами, а также по планированию ремонта сваркой под давлением. Применительно к типичным дефектам магистральных трубопроводов (локальные и общие коррозионные повреждения металла, трещины, дефекты формы) предложены критерии для оценки их допустимости с позиций степени снижения несущей способности трубопровода как при эксплуатации, так и во время ремонта (рис. 17). Особое внимание уделено вопросам планирования ремонтных работ с использованием различных усиливающих конструкций: сварных бандажей, герметичных муфт, муфт с компаундным наполнителем.

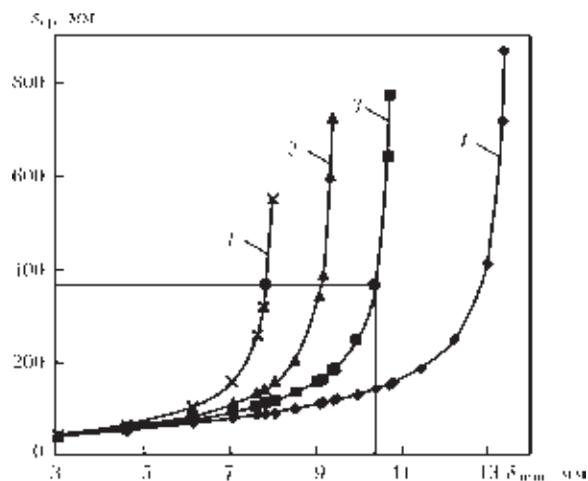


Рис. 17. Зависимость критической длины дефекта типа локального утонения  $s_{кр}$  от минимальной допустимой толщины  $\delta_{\min}$  стенки трубы 1420×20 мм из стали 17Г1С при различном внутреннем давлении: 1 — 4,5; 2 — 5,25; 3 — 6,0; 4 — 7,5 МПа

Поскольку оборудование для тепловых и атомных электростанций работает при высоких температурах и давлениях, то применение традиционных средств неразрушающего контроля в процессе эксплуатации невозможно. Поэтому необходимо создание методов и средств для мониторинга технического состояния энергетических объектов. Были проведены исследования, которые впервые показали возможность применения метода акустической эмиссии для этой цели. На рис. 18 приведены графики испытаний на растяжение образцов из стали 15Х1М1Ф при комнатной температуре и 500° С. Как видно, сохраняется акустическая активность на всех стадиях деформирования материала при высокой температуре, что позволяет прогнозировать разрушающие нагрузки с достаточной достоверностью.

Разработана и реализуется «Программа работ непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга на оборудовании ТЭЦ «Киевэнерго». На первом этапе исследованы диагностические контрольные параметры трубопроводов промежуточного перегрева, подогревателей высокого давления и деаэратора, создана и смонтирована система непрерывного мониторинга трубопроводов промежуточного перегрева. Система запущена в опытную эксплуатацию (рис. 19). Принято решение по внедрению средств и технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга оборудования других ТЭЦ.

Как известно, к тяжелым экологическим последствиям приводят аварии на нефтегазовых промыслах. Одна из таких аварий произошла в 2010 г. в Мексиканском заливе на нефтедобывающей платформе, где из поврежденной скважины на глубине 1500 м произошло неконтролируемое вытекание нефти. Специалисты института разработали способ соединения разрушенных труб скважин во время вытекания нефти. Был разра-

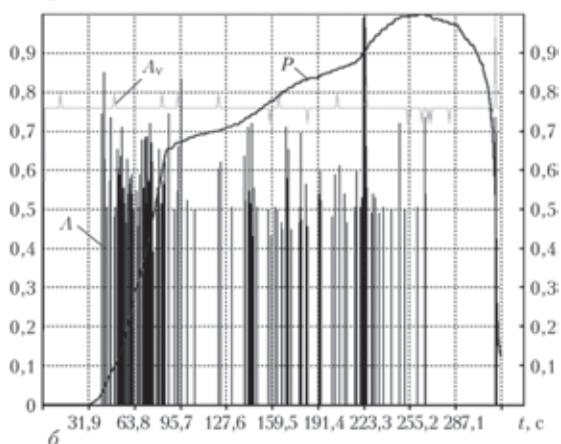
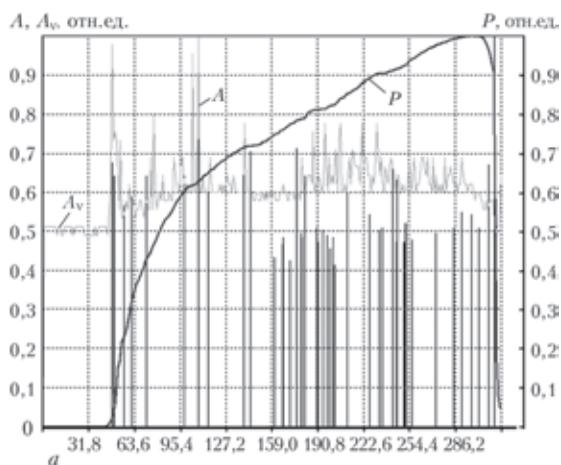


Рис. 18. Сопоставление сигналы акустической эмиссии в растягиваемых образцах из стали 15Х1М1Ф при комнатной температуре (а) и 500 °С (б) (А — амплитуда;  $A_v$  — амплитуда непрерывной эмиссии;  $P$  — нагрузка)

ботан и изготовлен соединительный модуль, который успешно прошел испытания (рис. 20). Функциональная схема его работы заключается в следующем. С помощью грузоподъемных механизмов опускается модуль к поврежденной части скважины. Он захватывается технологическими устройствами, которые удерживают модуль в вертикальном положении и не дают возможности вытекающему потоку сбросить его в сторону. При этом не происходит динамического удара и срыва



Рис. 19. Одна из точек измерения акустико-эмиссионной активности трубопровода промежуточного перегрева пара Киевской ТЭЦ-6



Рис. 20. Модуль для соединения разрушенных труб скважин

модуля с места закрепления благодаря имеющимся в конструкции модуля необходимым отверстиям, которые обеспечивают свободное вытекание интенсивного потока нефти в окружающую среду. Затем эти отверстия модуля перекрываются. Для этого используются гидроцилиндры и специальные шторки, предусмотренные конструкцией модуля. После завершения работы гидроцилиндров и перекрытия отверстий модуля нефть направляется в нужном направлении по трубопроводу.

Таковы разработки института, предназначенные для современной энергетики. Исследования и создание новых технологий продолжаются.

Presented is a series of developments of the E. O. Paton Electric Welding Institute for power engineering, in particular, welding technologies of large dimension turbine rotors, electron beam welding of large thickness semi-products from high-strength steels, submerged arc welding technology and pulsating flash-butt welding of pipes for large diameter main gas pipelines, technology and equipment for development of energy-saving heat-exchanging devices. The developments, directed on increase of fuel element corrosion resistance and safe operation of nuclear power station due to application of mechanized high-temperature wear-resistant surfacing of pipe fittings by corrosion resistant alloys, were marked. Practical recommendations on repair of main pipelines without their removal from operation are presented. The investigations showing the possibility of acoustic emission application for monitoring of the welded structures operating at high temperatures were carried out. The method for prevention of catastrophic oil outflow from fractured pipes of wells of oil-refining platforms was developed. Figures 20.

*Keywords:* submerged arc welding, pulsating flash-butt welding, electron-beam welding, protecting coating of fuels elements, finned plane-oval tubes, ultrasonic testing of welds, acoustic emission, wear-resistant surfacing, technical diagnostic, connecting module.

Поступила в редакцию  
01.07.2013

# ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛАСТИНАХ

## Сообщение 2

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, О. И. БОЙЧУК

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

Получено и проанализировано аналитическое решение задачи по оценке методом АЭ сканирования существующих или развивающихся в процессе эксплуатации дефектов в листовых конструкциях. Решение применено на примере пластины бесконечных размеров, что может быть использовано для листовых конструкций больших габаритов. Поставленная задача решена путем наложения двух независимых решений с разными источниками возбуждения. В первом случае источником возбуждения упругой волны является импульс на излучающем датчике, во втором – ответная волна, полученная от источника. Показано, как генерированная датчиком АЭ волна, отразившись от дефектной области, возвращается к нему с измененной формой и амплитудами, зависящими от плотности и величины дефектов. Полученное решение позволяет определять координаты места возникновения области с развивающимися дефектами и проводить, в дополнение к АЭ контролю, оценку этих дефектов. Выполненные расчеты показывают, что с использованием разработанного метода становится возможным определение координат и оценка текущего состояния материала для областей с неразвивающимися дефектами таким же образом, как и для развивающихся, поскольку при воздействии сканирующего источника АЭ волн на область с дефектами последняя становится самостоятельным источником акустического излучения, который может быть зафиксирован датчиками мониторинговой системы АЭ контроля с последующей оценкой теми же способами, которые используют при оценке развивающихся дефектов. Библиогр. 5, рис. 4.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия (АЭ), АЭ сканирование, волны деформаций, математическое моделирование физических процессов

В Сообщении 1\* были рассмотрены процессы искажения акустических волн, вызванные наличием дефектов, расположенных на цилиндрической поверхности симметрично относительно центра излучения. Показано, что сопротивление распространению акустических волн определяют плотность и размеры области с дефектами. Появляются волны, отраженные от дефектной области, и распространяющиеся в обе стороны от поверхности с дефектами. Таким образом, цилиндрическая поверхность с дефектами становится источником новых волн, зависящих от плотности дефектов на цилиндре (в нашем случае условной величины  $\beta_k$ ). С увеличением  $\beta_k$  преодолевшие акустический барьер волны существенно изменяют свою форму. В то же время цилиндрическая поверхность с равномерно распределенными дефектами скорее частный случай и рассмотрен был для подтверждения работы дефектной области как нового источника излучения. Полученные в Сообщении 1 результаты дают возможность рассмотреть более общий случай, когда дефекты сосредотачиваются в некоторой области с произвольными координатами по отношению к источнику излучения (рис. 1).

Поставленную задачу будем решать путем наложения двух независимых решений с разными источниками возбуждения. В первом случае

источником возбуждения упругой волны будет импульс на излучающем датчике, во втором – ответная волна, полученная от источника, мощность которого пропорциональна коэффициенту  $\beta_k$ . Отраженная от дефектной области волна будет распространяться со сдвигом по времени, равному расстоянию до дефектной области, деленному на скорость распространения волны в данном мате-

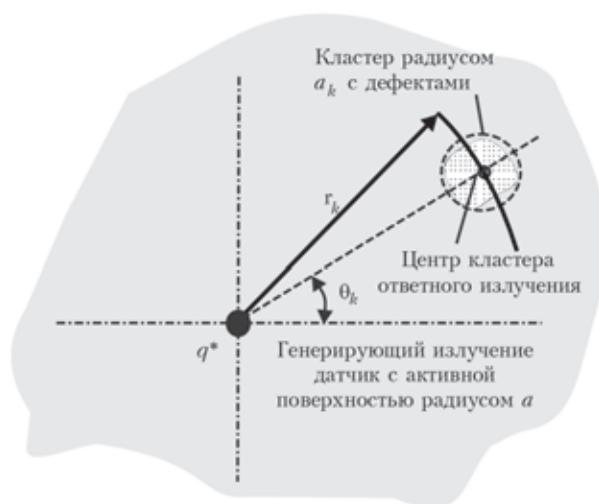


Рис. 1. Пластина бесконечных размеров с областью дефектов, образующихся в процессе разрушения, и датчиком, генерирующим излучение

\* Здесь и далее по тексту: Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – №4. – С. 30–36.



риале. Дефектная область будет ограничена цилиндром радиуса  $a_k$  с центром в центре цилиндра.

Дифференциальное уравнение для расчета перемещений поверхности пластины в направлении координаты  $r$  при условии постоянного значения сопротивления материала пластины распространению упругой волны имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \alpha \beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0}{\delta} \frac{\delta(r-r_0)\delta(t-t_k)}{2\pi r},$$

где  $t_k$  – время сдвига начала действия возбужденного источника после прихода к нему волны от возбуждающего источника;  $\beta$  – коэффициент, характеризующий затухание волн в пластине.

Граничные и начальные условия запишем в виде:  $w = 0$  при  $t = 0, \infty$  и  $r = \infty$ . При  $r = 0$  и  $t > 0$   $w \neq 0, \infty$ .

Тогда, положив  $dV_0 = 2\pi r_0 q^* dr_0$  для  $d\varphi$ , а затем  $\varphi$  при  $t_k=0$ , получим [1–5]:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{aq^* C_1}{2\pi\delta} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} J_1(\alpha a) J_0(\alpha r) \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t\right) \frac{\sin(\alpha C_1 |k| t)}{\alpha |k|} d\alpha, \quad k > 0, \\ \varphi &= \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{vaq^* C_1}{2\pi\delta} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} J_1(\alpha a) J_0(\alpha r) \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t\right) \frac{\text{sh}(\alpha C_1 |k| t)}{\alpha |k|} d\alpha, \quad k < 0, \end{aligned}$$

где  $k = \sqrt{1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}$ ;  $q^*$  – импульс возбуждения на генерирующем датчике в направлении оси  $r$ , см·с;  $a$  – активная контактная поверхность АЭ датчика-излучателя.

С учетом формулы (6) из Сообщения 1 для перемещений в кластере получим:

$$\begin{aligned} w_k &= \frac{\nu q^* a C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t_k\right) \sin[\alpha C_1 t_k |k|] d\alpha, \quad k > 0, \\ w_k &= \frac{\nu q^* a C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \times \end{aligned}$$

$$\times \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1^2}{2} t_k\right) \text{sh}[\alpha C_1 t_k |k|] d\alpha, \quad k < 0.$$

Если положить значение импульса отклика дефектной области на воздействие волны от генерирующего источника излучения  $q^* = w_k b_k t_k^*$ , где  $t_k^* = 2a_k/C_1$ , а  $b_k = (\beta_k - \beta)C_1$ , то перемещения под сканирующим датчиком  $w_c$  от возбужденного (ответного) источника будут:

$$\begin{aligned} \text{при } k > 0: \quad w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \times \\ &\times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2}\right) \sin[\alpha r_k |k|] d\alpha; \\ \text{при } k < 0: \quad w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \times \\ &\times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \exp\left(-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2}\right) \text{sh}[\alpha r_k |k|] d\alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\beta_k$  – коэффициент, характеризующий величину сопротивления области с дефектами перемещению упругой возбужденной генерирующим источником волны ( $\beta_k \geq \beta$ );  $a_k$  – радиус кластера области с дефектами;  $t_k^*$  – время прохождения сигнала АЭ через область с дефектами диаметром  $2a_k$ ;  $c$ ;  $a$  – радиус активной, контактирующей с поверхностью пластины части АЭ датчика, см.

В случае, если АЭ датчик имеет явно выраженную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), то интегрирование выражений для определения перемещений необходимо выполнять с учетом этой характеристики. Так, для случая, когда показатель кривой изменения АЧХ равен  $\xi$ , значение  $w_c$  может быть подсчитано по приведенным ниже формулам:

$$\begin{aligned} w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2} - \xi^2 (\alpha - \alpha_0)^2\right] \sin[\alpha r_k |k|] d\alpha, \quad k > 0, \\ w_c &= \frac{2\nu w_k a_k^2 (\beta_k - \beta) C_1}{(1-\nu)(1-2\nu)} \times \\ &\times \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\alpha J_1(\alpha a_k) J_0(\alpha r_k)}{|k|} \exp\left[-\frac{\alpha\beta C_1 r_k}{2} - \xi^2 (\alpha - \alpha_0)^2\right] \times \\ &\times \text{sh}[\alpha r_k |k|] d\alpha, \quad k < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

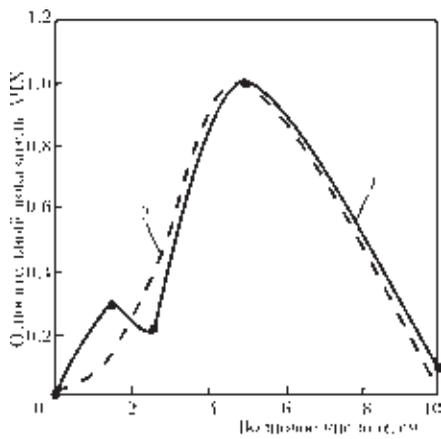


Рис. 2. АЧХ АЭ датчика типа ДАЕ системы ЕМА3,9 (по данным М.А.Яременко и Л.Ф.Харченко): 1 – реальная; 2 – расчетная

Для датчиков типа ДАЕ этот коэффициент равен 0,4 см, величина  $\alpha_0 = 4,4 \text{ см}^{-1}$ . График АЧХ для этого датчика приведен на рис. 2.

Формулы (1) и (2) могут быть использованы при оценке существующих или образующихся в процессе эксплуатации повреждений в областях пластины, где есть показания АЭ аппаратуры с указанием опасности начальных уровней. В этом случае, зная расстояние до проблемного кластера  $r_k$  и величину перемещений  $w_k$ , полученных генерирующим волну датчиком от ответного возбужденного, можно определить величину  $\beta_k C_1$ . Зная  $\beta_k C_1$ , далее по предварительно полученным экспериментальным данным определяем степень опасности зафиксированного места.

Практическое применение разработанной методики может быть осуществлено в следующем порядке. Пусть на поверхности крупногабаритной емкости установлены АЭ датчики, работающие в режиме непрерывного мониторинга. В какой-то момент времени контрольная аппаратура обнаружила область с развивающимися дефектами, например, категории второго предупреждения. Область кластеризуется с параметрами  $r_k$  и  $a_k$  кластера. Для более точной оценки состояния материала в зафиксированной области на расстоянии  $r_k$  от первого сработавшего датчика запустим зондирующую волну системой генерации аппаратуры. Полученная волна распространяется и достигает дефектной области с кластером радиусом  $a_k$ , отражается от нее и возвращается обратно. Через время  $t_k$ , равное расстоянию до центра кластера, деленному на скорость распространения волны, запустивший ее датчик сработает, зафиксировав перемещение  $w$ . Зная это перемещение и соответствующее ему значение  $\beta_k C_1$  и процент деформации разрушения для данного материала, уточняем состояние материала в этой области. Такая же картина получается и в том случае, если проблемная область не имеет развивающихся дефектов. На-

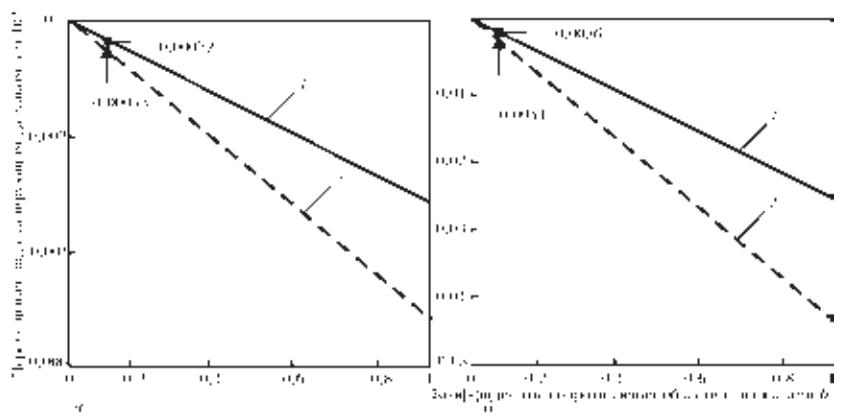


Рис. 3. Перемещения на сканирующем датчике в зависимости от сопротивления области с дефектами  $b_k = (\beta_k - \beta)C_1$  радиусом  $a_k = 5 \text{ см}$ , обнаруженной на расстояниях  $r_k = 100$  и  $200 \text{ см}$  от него: а – с учетом реальной АЧХ датчика (рис. 2); б – равномерной АЧХ; 1 –  $r_k = 200 \text{ см}$ ; 2 –  $100$

личие неразвивающихся дефектов приводит к повышению коэффициента сопротивления  $\beta_k$  в этой области, а следовательно, возникновению в ней источника излучения, координаты которого будут определены системой датчиков, а оценка области будет сделана по шкале таблицы значения коэффициентов сопротивления среды [1].

В качестве примера рассмотрим два случая, когда центр кластера дефектной области расположен на расстоянии  $r_k = 100$  и  $200 \text{ см}$  от сканирующего источника, а радиус образовавшегося кластера составляет  $a_k = 5 \text{ см}$  в обоих случаях. Радиус активной поверхности используемого при контроле стандартного АЭ датчика равен  $a = 0,55 \text{ см}$ . Условный коэффициент затухания сигнала в пластине из материала сталь 20 составляет  $\beta C_1 = 0,002$ . Для расчета используем реальную АЧХ АЭ датчика (рис. 2) и для сравнения равномерную на промежутке  $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$ . На рис. 3 в пределах пропускающей способности АЭ датчика ( $\alpha_1 = 1$ ;  $\alpha_2 = 10 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует диапазону частот от 80 до 800 кГц) представлены результаты расчета для различных значений  $(\beta_k - \beta)C_1$  при использовании реальной характеристики АЭ датчика (рис. 2) и равномерной в пределах  $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$ . Значения  $\beta_k C_1$ , процент деформации разрушения берутся из таблицы [1]. Если, например, за допустимую деформацию материала пластины принять  $[\epsilon] = 1,5 \%$ , что равносильно сопротивлению области с дефектами, равному 0,1 (см. таблицу), то на расстоянии кластера области с дефектами от сканирующего датчика равному 200 см значение  $w_c$  на сканирующем датчике в соответствии с графиком рис. 2 не должно превышать  $0,00032 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , а при  $r_k = 100 \text{ см}$  эта величина равна  $0,00053 \cdot 10^{-5} \text{ см}$  (при сканировании пластины стандартным для АЭ оборудования ЕМА 3,9 сигналом). Таким образом могут быть построены таблицы значений  $w_c$  для различных величин относительной деформации дефектной области. Зная  $w_c$ , можно определить опасность развития процессов разрушения мате-

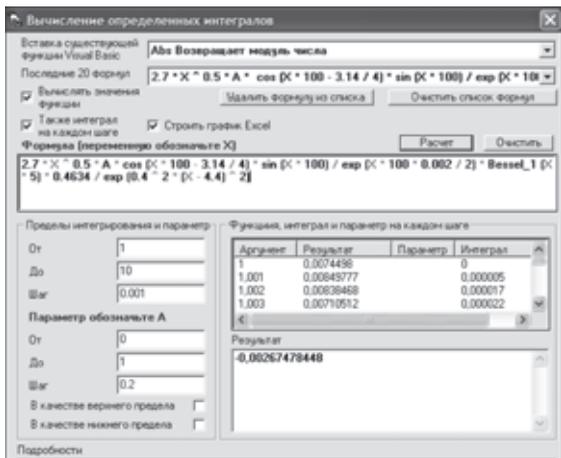


Рис. 4. Окно универсальной программы вычисления интегралов

риала. Как видно из рис. 3, сканирование пластины широкополосным АЭ датчиком с равномерной АЧХ в пределах  $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$  показывает значительно большие значения величины  $w_c$  (рис. 3, б).

Для выполнения интегрирования в представленных выше формулах разработали универсальную программу с параметром, обеспечивающим интегрирование по необходимому для построения графиков количеству точек. Формула записывается в окне программы, а пределы интегрирования и параметр с необходимым шагом выбираются в полях пределов и параметров, представленных в левой части окна. Верхнее поле окна программы содержит некоторые обычные и специальные функции, часто встречающиеся при расчетах. Требуемая функция выбирается из списка курсором мыши и нажатием кнопки ввода вставляется в нужное место формулы. За полем функций следует поле, содержащее в памяти программы последние 20 расчетных формул. Остальные обозначения ясны из рис. 4. Программа при необходимости автоматически выводит результаты расчета в виде таблиц и графиков в Excel Microsoft Office.

## Выводы

Получено аналитическое решение задачи сканирования генерирующим АЭ датчиком пластины с образовавшейся в ней локальной областью дефектов. Обратное к датчику возвращается изменившая свою форму и амплитуды отраженная от дефектной области волна. Искажение формы и амплитуд отраженной волны зависит от плотности и величины изменений структуры материала в области. Полученное решение, используя принцип возбужденного источника, позволяет определять координаты места возникновения области с развивающимися дефектами и проводить дополнительную к АЭ методу оценку этих дефектов.

Координаты и оценка областей с неразвивающимися дефектами осуществляется таким же образом, поскольку при воздействии сканирующего источника АЭ волн на область с дефектами последняя становится самостоятельным источником излучения и может быть зафиксирована датчиками мониторинговой системы.

Полученное решение предполагается использовать при разработке методики и технологии поиска и оценки дефектов путем сканирования волнами АЭ листовых конструкций, оснащенных постоянно действующими АЭ датчиками, работающими в режиме непрерывного мониторинга.

1. Недосека А. Я., Недосека С. А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. Сообщение 1. – 2013. – № 2. – С. 3–8.
2. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2 // Там же. – 2013. – № 2. – С. 9–14.
3. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е.Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
4. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.

Analytical solution of a problem on evaluation of defects existing or developing in process of operation in sheet structures was obtained and analyzed using AE scanning method. The solution is shown by example of infinite size plate that can be used for large dimension sheet structures. The set problem was solved by superposition of two independent solutions with different sources of excitation. In the first case, the source of elastic wave excitation is a pulse on emitting transducer, in the second it is response wave obtained from the source. It is shown how the AE wave generated by the transducer and reflected from the defect area, returns to it with changed form and amplitudes depending on density and defect size. Obtained solution allows determining the coordinates of place of appearance of area with developing defects and carrying out evaluation of these defects in addition to AE testing. Performed calculations showed that the application of developed method allows determination of coordinates and evaluation of current material state for areas with undeveloping defects in the same way as for developing ones, since under effect of scanning source of AE waves on the area with defects, the latter transforms in the independent acoustic emission source which can be registered by transducers of AE testing monitoring system with further evaluation by the same methods, used in evaluation of the developing defects. Ref. 5, Figures 4.

К е y w o r d s : Acoustic emission (AE), AE scanning, deformation waves, mathematic modelling of physical processes.

Поступила в редакцию  
05.06.2013

# ПОДВИЖНОЕ ЛОКАЛЬНОЕ НАМАГНИЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИ МАГНИТОПОРОШКОВОМ КОНТРОЛЕ

**В. А. ТРОИЦКИЙ**

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

Рассмотрены подвижные намагничивающие устройства (НУ) для проведения дефектоскопии различных металлических конструкций. Представлены схемы и принципы работы НУ, уделено внимание их использованию в различных условиях. Отмечены преимущества применения НУ для выявления глубоко расположенных подповерхностных дефектов, рассмотрены технические характеристики и конструкция различных НУ. Использование подвижных намагничивающих устройств открывает новые дефектоскопические возможности для магнитного, в том числе магнитопорошкового контроля, возможность создания особых подвижных поисковых систем. Использование подвижных намагничивающих устройств, перемещаемых по поверхности в разных направлениях, исключает необходимость многократных трудоемких перестановок НУ по поверхности ферромагнитного изделия, уменьшает вероятность появления пропусков и неконтролируемых зон. Появляется возможность обнаружения трещин различной ориентации, динамического, знакопеременного намагничивания за счет разнообразного перемещения подвижных полюсов, что способствует повышению выявления дефектов. Возможность шунтирования основного магнитного потока, введение дополнительных полюсных наконечников различной конфигурации позволяют разрабатывать технологии более надежного магнитопорошкового контроля, включая оценку глубоко залегающих дефектов. Мобильные подвижные намагничивающие устройства с изменяемой величиной основного магнитного потока и отдельных составляющих полей рассеяния должны найти применение не только для магнитопорошкового контроля, но и для других видов магнитных испытаний. Библиогр. 18, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, подвижные намагничивающие устройства, дефектоскопия, шунтирование основного магнитного потока

Наиболее распространенным методом обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов, зон усталости металлоконструкций [1, 2] является магнитопорошковый контроль (МПК). Объекты МПК – это детали и узлы разнообразных транспортных средств, кранов, станочного оборудования и пр. В МПК используется ряд стандартов [3–6], которые регламентируют поиск дефектов в приложенном или остаточном магнитных полях, создаваемых прилагаемыми намагничивающими устройствами (НУ). В отличие от других методов неразрушающего контроля (НК) при МПК по этим стандартам нет возможности вести непрерывный разнонаправленный поиск дефектов за счет плавного изменения направления магнитного потока, с помощью которого ведется этот поиск.

Этот недостаток можно устранить [2, 7–10], используя подвижные НУ на основе постоянных (неодим, железо, бор) магнитов. С их помощью открылись новые дефектоскопические возможности для магнитного контроля, в том числе МПК, возникли подвижные поисковые системы локального намагничивания. Использование подвижных намагничивающих устройств, перемещаемых в разных направлениях, обеспечивает поиск, сканирование, исключает необходимость многократных трудоемких перестановок прикладываемых НУ к поверхности ферромагнитного изделия, умень-

шает вероятность пропусков дефектов и неконтролируемых зон. Появилась возможность обнаружения трещин различной ориентации, а также знакопеременного намагничивания в зоне индикации за счет возвратно-поступательного перемещения полюсов, что дополнительно способствует повышению выявления дефектов. Разработана и внедрена серия таких подвижных НУ. На рис. 1 показано три простейшие конструктивные схемы исполнения мобильных сканирующих устройств серии ТВА с полюсами в виде дискообразных катков. Они отличаются величиной магнитной проводимости зоны сопряжения их с поверхностью объекта. На рис. 1, а – линия касания круглого полюса и поверхности изделия; 1, б – это пятно, образуемое четырьмя пазами, заполненными ферромагнитными стержнями (роликами); 1, в – расширенная зона контакта за счет полюсного наконечника и нескольких последовательно расположенных контактных роликов в каждом пазу, невилирующих неровности поверхности.

Каждое НУ имеет два полюса и соединительный магнитопровод с источником магнитодвижущей силы (МДС). Магнитные полюса могут двигаться синхронно при использовании жесткого соединительного магнитопровода или раздельно один от другого. При этом соединительный магнитопровод выполняется гибким.

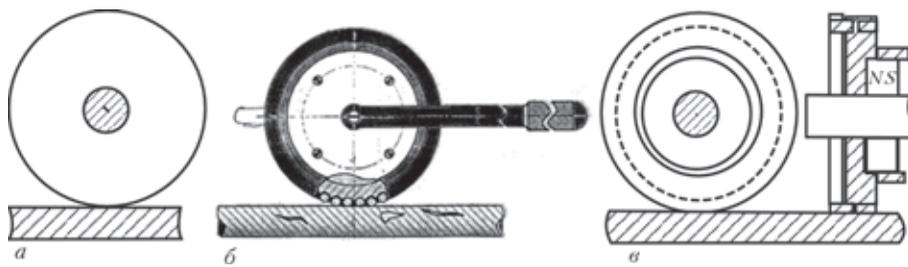


Рис. 1. Варианты конструктивного исполнения устройств серии ТВА: а – с гладкой поверхностью (ТВА-1); б – с пазами и роликами (ТВА-2); в – с полусным наконечником и несколькими роликами в каждом пазу (ТВА-3)

На рис. 1 показано по одному полюсу, расстояние между которыми определяется шириной контролируемой зоны. Обычно это 100...150 мм, а диаметры круглых полюсов от 50 до 150 мм. Для эффективного обнаружения дефектов важно в изделии создать достаточную тангенциальную составляющую, которая должна в несколько раз превышать нормальную составляющую магнитного поля. При неизменной величине МДС для увеличения тангенциальной составляющей магнитного поля надо максимально увеличить магнитную проводимость зоны сопряжения полюсов с изделием. Это достигается за счет изготовления по образующей полюса пазов, в которых располагаются ферромагнитные стержни трапецидального или круглого сечения. На рис. 2 показаны варианты исполнения у ТВА-2, -3 (см. рис. 1) зон сопряжения повышенной магнитной проводимости с заполнением пазов круглыми или трапецидальными стержнями.

При расчете зон сопряжения повышенной проводимости в устройствах ТВА-2, -3 учитывается диаметр  $D$  полюса, сечение (диаметр  $d$ ) подвижных элементов, расчетная индукция зуба, число элементов (роликов) в пазу и т. п. Так, на рис. 2 оптимальным для систем ТВА-2, -3 с касанием в четырех точках принято  $D = 114$  мм,  $d = 4,3$  мм. Увеличением ширины зоны контакта за счет наконечника (ТВА-3) и диаметра подвижного полюса удастся еще увеличить тангенциальную составляющую поискового магнитного поля, расширить зону контакта, увеличить ее магнитную проводимость. Вариантов конструктивных решений достижения высокой магнитной проводимости может быть много. Так, только увеличением диаметра  $D$  полюса при сохранении ширины зуба и увеличении диаметра  $d$  ферромагнитных стержней (ширины паза) можно контактное пятно довести до 5...6 пазов и т. д.

Интересна особенность динамики поведения контактных стержней в пазах в процессе движения, перемещения зоны локального намагничивания по ферромагнитной поверхности объекта. Ферромагнитные стержни (в каждом пазу один или несколько) любого профиля (круглого или трапецидального и т.п.) находятся в пазу до тех пор, пока паз не приблизится к ферромагнитной

поверхности объекта, к большой ферромагнитной массе. Поскольку стержни (ролики) в пазу не закреплены, они могут свободно перемещаться. При приближении паза к зоне контакта с изделием, к зоне мощного магнитного потока ферромагнитный стержень (ролик) вытягивается полем из паза и притягивается к изделию. Так обеспечивается высокая магнитная проводимость зоны контакта с изделием. После выхода паза из зоны контакта с изделием каждый стержень (ролик) затягивается обратно в паз полем рассеяния полюса, которое есть вокруг каждого паза.

Таким образом, стержень (ролик) может находиться в двух фазах: транспортной (далеко от изделия) и в контакте с изделием. На рис. 2 показано, как при приближении к поверхности изделия стержень (ролик) выходит из паза. Конструкция полюса с заполненными пазами (табл. 1, 2) увеличивает приложенное магнитное поле внутри изделия. Все устройства ТВА могут изменять направление локального намагничивания до  $180^\circ$ . Максимальное поле рассеяния от дефекта возникает тогда, когда магнитное поле от ТВА направлено перпендикулярно плоскости дефекта. Поэтому очень важно поиск дефектов и намагничивание проводить в разных направлениях, с разной интенсивностью возвратно-поступательных движений, т. е. проводить активный поиск дефектов с низкочастотным воздействием на магнитный порошок. За режимом поиска следует режим оценки обнаружений индикации. При этом должно быть учтено направление

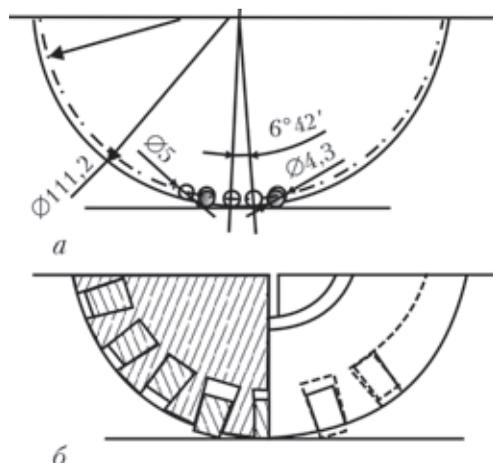


Рис. 2. Конструкции подвижных полюсов с роликами (а) и трапецидальными стержнями в конструкции типа ТВА-2 (б)



намагничивания и увеличена тангенциальная составляющая магнитного поля, ориентированная перпендикулярно найденной индикации.

В оценочном режиме, в котором устройство ТВА неподвижно, можно увеличить тангенциальную составляющую магнитного поля и за счет съемных дополнительных полюсных элементов. Примеры некоторых из них показаны на рис. 3. С дополнительными полюсными элементами возрастают магнитное поле внутри изделия и усилие притяжения ТВА к объекту. Кроме увеличения тангенциальной составляющей в оценочном режиме желательно принимать меры по уменьшению нормальной составляющей магнитного поля, которое обычно понижает достоверность результатов этого метода НК, экранировать ее.

В поисковом режиме через изделие пропускается только часть магнитного потока, которое создает устройство ТВА, поэтому оно легко передвигается. При этом значительная часть магнитного потока замыкается вне зоны контроля, а магнитная проводимость зоны контакта с изделием относительно низкая. При оценке конкретной индикации, признания ее дефектом (или нет) при

необходимости могут устанавливаться дополнительные элементы магнитных полюсов, которые расширяют зону контакта с изделием (см. рис. 3). Они в определенной мере повторяют локальную конфигурацию поверхности изделия и поверхность круглого полюса. Если индикация (рисунок из магнитного порошка) находится над дефектом, то с увеличением тангенциальной составляющей магнитного поля контуры ее, плотность, рельеф индикаторного рисунка усиливаются. Если неплотности нет, то изменение магнитного потока в изучаемой зоне устраняет или изменяет бесформенный сбор магнитного порошка, индикация рассеивается.

На рис. 3 показаны примеры расположения устройств ТВА со съемными дополнительными элементами на объектах разного профиля. На изделии круглого сечения ТВА может располагаться как вдоль, так и перпендикулярно оси объекта контроля. Во втором случае эти элементы должны иметь расточку по диаметру объекта контроля. Для углового объекта они должны заполнить пространство между изделием и плоскостью подвижного полюса. На рис. 4 показана схема экс-

Объект и направление сканирования	Конструкции дополнительных полюсных элементов и их расположение при оценке результатов МПК
Тела вращения малого диаметра, продольное сканирование	
Тела вращения малого диаметра, поперечное сканирование	
Угловые и плоскостные конструкции, продольное сканирование	
Съемные диски для повторения профиля поверхности объекта круглого или плоского сечения	

Рис. 3. Съемные дополнительные полюсные элементы для разных форм, используемые для увеличения тангенциальной составляющей магнитного поля



перимента на объекте в виде пластины из стали размерами 320×165×14 мм, на которой располагали разные ТВА, а измерение магнитного поля проводили тесломером в зазоре  $\delta = 2,0$  мм внутри объекта по центру зазора и по его краям. Места измерений отмечены точками.

При наличии дополнительных полюсных элементов тангенциальная составляющая магнитного поля возрастает в 1,5...2,0 раза. Аналогичные опыты с увеличением расстояния между полюсами в несколько раз за счет удлинения магнитопровода практически не изменили результатов экспериментов. Были испытаны различные типы дополнительных полюсных элементов. Опыты показали, что превносимая дополнительная магнитная проводимость зоны сопряжения зависит только от площади контакта полюса и тела изделия. Это явление происходит до определенного числа съемных полюсных элементов, число которых может при необходимости варьироваться, может быть по одному (рис. 3) или по два (рис. 4) на каждом полюсе. Дальнейшее увеличение площади контакта с изделием существенно не изменяет результаты.

В том случае, если конфигурация поверхности изделия сложная с нерегулярным рельефом, на-

пример, такая, как элементы подвижного железнодорожного состава, то должны использоваться намагничивающие устройства (рис. 5, 6), полюса которых соединены шарнирными или гибкими магнитопроводами, способными обеспечивать синхронное или раздельное (один полюс двигается, а другой стоит) перемещение каждого из полюсов в разных направлениях и разных плоскостях. Наиболее эффективными оказались ТВА-4 с гибкими шарнирными соединительными магнитопроводами. На рис. 6 приведены фотографии локального намагничивания различных частей боковин железнодорожных тележек и колес.

Показаны примеры использования ТВА-4 с шарнирным соединительным магнитопроводом. При необходимости полюса ТВА-4 устанавливаются последовательно (рис. 6, в, г). Подобным локальным регулируемым намагничиванием можно выявить практически все поверхностные и подповерхностные дефекты, в ободах колес, в деталях подвижного состава. На рис. 7 показаны две позиции устройства ТВА-5 с одним подвижным полюсом, выполненным в виде платформы, способной перемещаться на 360° вокруг неподвижного полюса. Контактная сторона подвижной платформы, обращенная к изделию, имеет конструкцию, по-

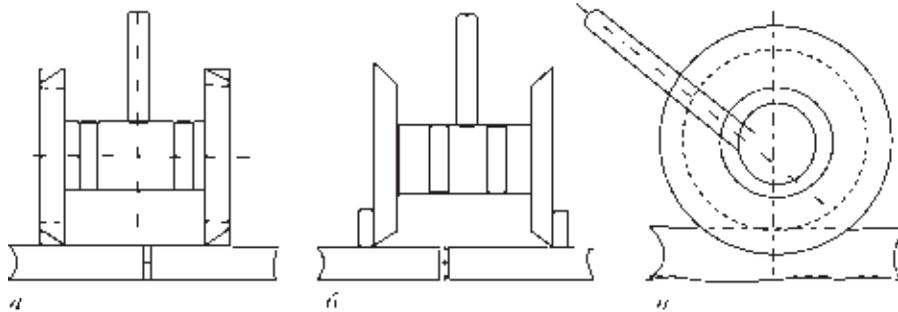


Рис. 4. Схема эксперимента по оценке величины магнитного поля внутри детали, разделенной на две части до (а) и после (б, в) установки дополнительных полюсных элементов для плоских (а) и круглых (б) объектов

Таблица 1. Технические характеристики некоторых намагничивающих устройств ТВА

Тип устройства	Размеры полюсов			Напряженность магнитного поля вне объекта контроля, кА/м		Особенности конструкций ТВА, использованных в эксперименте
	диаметр	ширина	межполюсное расстояние	между полюсами	на наиболее удаленных азимутальных точках	
ТВА-1	114	10	75	25	75/81	Гладкие полюса (рис. 8)
ТВА-2	100	13	98	18	85/92	Полюса с контактными роликами (рис. 1; 2, а)
ТВА-3	110	23	180–110	0,8/11,5	61/64	Многоракурсное ТВА с независимым движением каждого полюса (рис. 6)

Таблица 2. Величина магнитного поля (кА/м) в верхней части воздушного зазора величиной 2 мм, разделяющего пластину 320×165×14 мм на две части (рис. 4)

Тип устройства	Без съемных дополнительных элементов	Со съемными приставными пластинами, имеющими разные размеры, мм		
		6×25×60	12×25×60	6×25×25
ТВА-1	186	250	265	210
ТВА-2	212	270	285	275
ТВА-3	285	302	308	294

Примечание. Измерения проводили тесломером с датчиком Холла

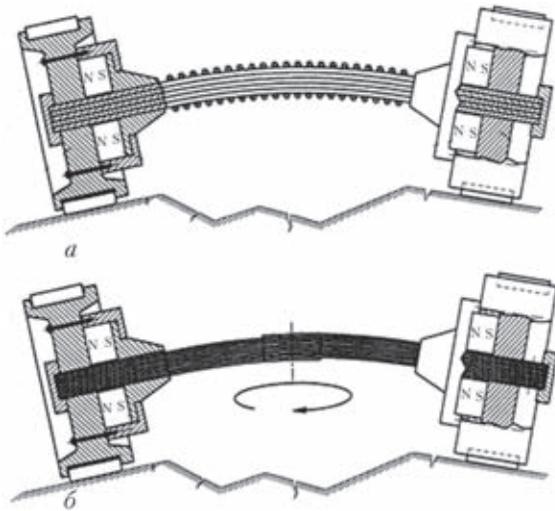


Рис. 5. Схемы ТВА для сложных нерегулярных поверхностей с соединительным магнитопроводом на гибких элементах: тросах (а) и пластинах (б)

добную ТВА-2 (см. рис. 1), т. е. содержит пазы с подвижными роликами. Полус с подвижной платформой легко перемещается оператором в зоне расположения неподвижного полюса.

Если ТВА предназначено для контроля изделия с определенной конкретной кривизной поверхности, например, для определенного диапазона диаметров валов, труб, то внешняя поверхность полюса изготавливается повторяющей эту кривизну.

На рис. 4 показаны специализированные устройства ТВА-1 с заострением или профилированием внешних плоскостей круглых магнитных полюсов. Это повышает магнитную проводимость в зоне контакта с проверяемым объектом аналогично сочленениям, показанным на рис. 3. Устройства ТВА на рис. 8 показаны в разных ракурсах, с дополнительными полюсными элементами в виде приставных пластин и без них.

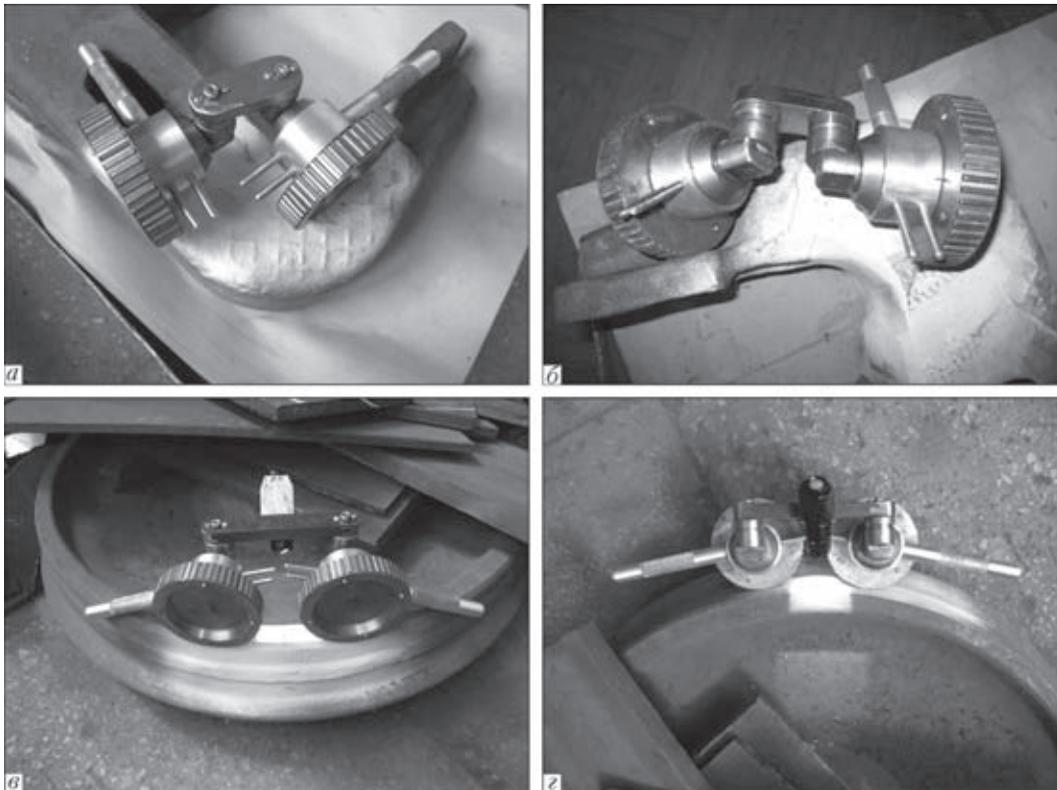


Рис. 6. Использование ТВА-4 для контроля качества боковин тележек (а, б) и элементов железнодорожных колес (в, г)



Рис. 7. Устройство ТВА-5 с подвижным полюсом, перемещаемым в зоне расположения неподвижного полюса



В литературе [1, 2, 11–13], посвященной выявляемости дефектов при МПК, показано, что магнитное поле более 100 А/см малоинформативно для обнаружения дефектов шириной 0,005...0,1 мм и глубиной  $h = 1,0...5,0$  мм. Причем величины полей над дефектами глубиной 5 и 1 мм могут отличаться только в 1,5...2,5 раза.

Это свидетельствует о том, что поиск практически всех поверхностных дефектов может проводиться на относительно слабом поле, а распознавание образа индикации на усиленном магнитном поле. Вместе с тем для обнаружения подповерхностных дефектов магнитотвердых металлов требуются магнитные поля больше, чем 100 А/см. Ширина магнитного следа от дефекта на поверхности увеличивается с ростом глубины его залегания, но происходит только до определенной глубины, за пределами которой ширина следа начинает убывать.

В табл. 2 приведены результаты исследований величины магнитных полей внутри щели 2 мм, расположенной между круглыми полюсами трех типов устройства серии ТВА при разных съемных дополнительных полюсных элементах, позволяющих существенно увеличить намагничивающее поле внутри детали. (Испытания выполнены ведущим инженером В. М. Горбиком.)

Из табл. 2 следует, что дополнительные элементы в виде приставных полюсных элементов значительно увеличивают магнитное поле внутри объекта контроля. Это наиболее эффективно проявилось для простейшего ТВА-1 с гладкими полюсами. Здесь магнитное поле выросло в 1,43 раза и наименее эффективно в случае ТВА-3 с пазами, где поле усилилось только в 1,08 раза, что и следовало ожидать. Таким образом, все модели ТВА обеспечивают глубокое регулируемое локальное

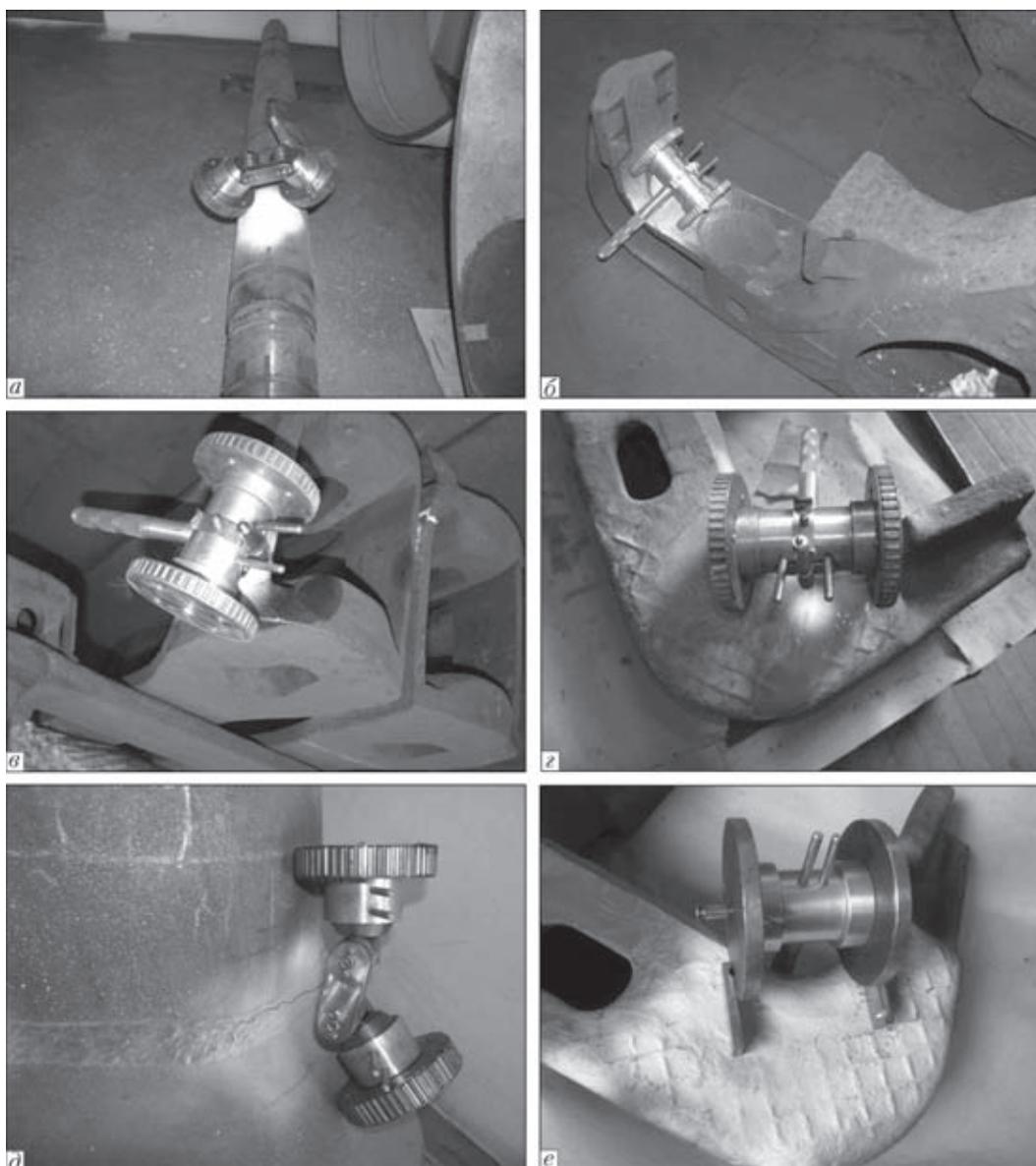


Рис. 8. Использование ТВА-4 на валу мощного компрессора (а); ТВА-2 на элементах железнодорожных конструкций (б–с); ТВА-4 на гйбе трубопровода диаметром 1020 мм (д); ТВА-1 с дополнительными полюсными элементами в режиме оценки индикации (е)



промагничивание излучаемых ферромагнитных объектов. Уменьшение намагничивающих полей, например, для магнитомягких сталей, легко получить уменьшением числа источников МДС, расположенных внутри соединительного магнитопровода ТВА, которые рассчитаны преимущественно для исследования магнитотвердых сталей больших толщин, имеют мощные многоэлементные источники МДС.

### Выводы

Подвижное локальное намагничивание приложенным магнитным полем открывает новые возможности для магнитных методов, расширяет возможности МПК, увеличивает в несколько раз его производительность, обеспечивает режимы поиска и оценки индикаций за счет величины и направления тангенциальной составляющей магнитного поля.

Мобильные намагничивающие устройства серии ТВА обеспечивают разнонаправленное пропускание через металлоконструкцию магнитного потока, поиск направления, дающего наиболее рельефную форму индикации, уменьшает количество ложных индикаций.

Возможность возвратно-поступательных перемещений устройств ТВА способствует лучшему распределению магнитного порошка, его концентрации над поверхностными полями, которые могут быть как над дефектом, так и над зонами внутренних напряжений, например, из-за усталости металла и других причин.

Поиск индикаций рекомендуется вначале вести при относительно небольшом магнитном поле, определяемом свойствами стали, типом ожидаемых дефектов и других обстоятельств, предусмотренных технологией контроля, а оценку индикаций проводить при усилении тангенциальной составляющей магнитного поля, используя, на-

пример, дополнительные полюсные элементы и экранирование нормальной составляющей поля в зоне индикации.

1. *Не разрушающий контроль качества сварных конструкций* / В. А. Троицкий, В. П. Радько, В. Г. Демидко, В. Т. Бобров. – Киев: Техника, 1986. – 159 с.
2. *Троицкий В. А.* Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. – Киев: Феникс, 2002. – 300 с.
3. *ISO 9934-1.* Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 1: General principles. – Geneva: ISO, 2001. – 14 p.
4. *ISO 9934-1.* Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 2: Detection media. Geneva: ISO, 2002. – 21 p.
5. *ISO 9934-1.* Non-destructive testing. Magnetic particle testing. Pt 3: Equipment. Geneva: ISO, 2002. 14 p.
6. *ГОСТ Р ИСО 9934-1–2011.* Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Ч. 1. Основные требования. – М., 2011.
7. *Пат. 51871* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій для магнітної дефектоскопії / В. О. Трійський, О. Г. Бондаренко, В. М. Горбик. – Дійсний з 10.08.2010.
8. *Пат. 77027* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій для магнітної дефектоскопії / В. О. Трійський, О. Г. Бондаренко, В. В. Самойлович. – Дійсний з 25.01.2013.
9. *Пат. 81659* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій / В. О. Трійський. – Дійсний з 10.07.13.
10. *Пат. 82447* Україна. Рухомий намагнічуючий пристрій для дефектоскопії протяжних конструкцій / В. О. Трійський. – Дійсний з 12.08.13.
11. *Шелихов Г. С.* Магнитопорошковая дефектоскопия / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Изд. Дом «Спектр», 2010. – 336 с.
12. *Пашагин А. П., Бенклевская Н. П.* Выявляемость поверхностных дефектов малого раскрытия при магнитной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2013. – № 1. – С. 66–70.
13. *Коваленко А.* Анализ факторов, влияющих на достоверность контроля трубопроводов магнитными дефектоскопиями // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8. – С. 30–36.
14. *Шелихов Г. С., Глазков Ю. А.* Особенности ГОСТ Р ИСО 9934-1 по магнитопорошковому контролю деталей // Там же. – 2013. – № 4. – С. 9–15.
15. *Патон Б. Е., Троицкий В. А.* Деятельность ИЭС им. Е. О. Патона в области неразрушающего контроля // Территория NDT. – 2013. – № 3.
16. *Пат. 82208* Україна. Намагнічуючий пристрій / В. О. Трійський, Г. Г. Луценко. – Дійсний з 25.07.2013.
17. *Пат. 82209* Україна. Намагнічуючий пристрій / В. О. Трійський, Г. Г. Луценко. – Дійсний з 25.07.2013.
18. *Пат. 62064* Україна. Спосіб виготовлення контрольних взірців для дефектоскопії / В. О. Трійський, О. Г. Бондаренко. – Дійсний з 10.08.2011.

The paper considers mobile magnetizers (MM) for performance of flaw detection of different metal structures. Schemes and principles of MM operation are shown and attention is given to their application under different conditions. The advantages of MM application for detection of deep-lying subsurface defects are noted and performance specification and structure of different MM are considered. Application of mobile magnetizers reveals the new flaw detection capabilities for magnetic as well as magnetic particle testing and possibility of development of special mobile detection systems. Using of mobile magnetizers, moving in different directions on the surface, eliminates the necessity of multiple laborious rearrangements of MM on the surface of ferromagnetic product, reduces the probability of missing and appearance of uncontrolled zones. There is a possibility of detection of cracks of different orientation, dynamic and alternated magnetization due to different movement of mobile poles that promotes increase of defect identification. Possibility of shunting of a main magnetic field and introduction of the additional pole pieces of different configuration allow developing the technologies of more reliable magnetic control, including evaluation of deep-lying defects. Mobile magnetizers with variable value of main magnetic field and separate constituents of leakage fields should find application in magnetic control as well as in other types of magnetic tests. References 18, Tables 2, Figures 8.

*Keywords:* non-destructive testing, mobile magnetizers, flaw detection, shunting of main magnetic field.

Поступила в редакцию  
13.01.2014



## ОСТАТОЧНОЕ РАСШИРЕНИЕ БАЛЛОНОВ (краткий обзор)

**Р. И. ДМИТРИЕНКО, Э. Ф. ГАРФ**

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

**В. П. ЧИЖИЧЕНКО**

ООО «Кислород сервис». 01103, г. Киев, ул. Киквидзе, 18, а. E-mail: 4288648@ukr.net

Представлен краткий обзор метода испытания поверочным гидравлическим давлением баллонов с определением коэффициента остаточного расширения. Показано, что существующий в Украине регламент переосвидетельствования баллонов высокого давления, находящихся в эксплуатации, не может гарантировать необходимый запас прочности. Для повышения надежности вновь изготавливаемых, и, особенно, длительное время пребывающих в эксплуатации баллонов в последние годы в ряде стран в регламент испытаний баллонов включается методика, предусматривающая определение коэффициента остаточного расширения. Этот коэффициент является интегральной характеристикой технического состояния баллона. Его использование особенно важно для баллонов, изготовленных и эксплуатируемых в Украине, поскольку, как известно, в силу особенностей технологии производства эти баллоны характеризуются значительной разнотолщинностью, большим рассеянием механических свойств и отношением предела текучести к временному сопротивлению, незначительно превышающим 0,5. Вместе с тем в последние годы на рынке Украины все большее распространение получают баллоны зарубежного производства. Технология их производства такова, что при этом практически исключается разнотолщинность, а используемые для изготовления баллонов стали имеют высокие механические свойства. В этой ситуации контроль за надежностью баллонов как при их поставке, так и в процессе эксплуатации необходим. При этом важным показателем является предельно допустимое значение коэффициента остаточного расширения при испытании пробным давлением. Библиогр. 27, рис. 2.

*Ключевые слова:* баллоны, освидетельствование, коэффициент запаса, остаточное расширение, водяная рубашка, деформация, внутреннее давление, изменение объема, испытания баллонов

При освидетельствовании баллонов после их производства, а также при периодическом освидетельствовании в процессе эксплуатации их нагружают поверочным давлением  $P_n$ , которое превышает рабочее  $P_p$  в 1,5 раза, а при отношении временного сопротивления к пределу текучести стали, из которой изготовлен баллон, более двух, может быть снижено до 1,25 раза [1]. В ряде стран для некоторых алюминиевых дыхательных баллонов для дайвинга используют коэффициент 5/3.

После такого испытания можно однозначно сказать, что коэффициент запаса прочности баллона не ниже коэффициента превышения поверочного давления над рабочим, а каким будет действительный коэффициент запаса прочности баллона сказать невозможно. Также невозможно оценить и коэффициент запаса по текучести. Такие испытания не позволяют обнаружить изменение геометрии баллона и оценить его остаточную деформацию, если она имела место. А, как известно, чем больше остаточная деформация, тем меньше запас пластичности, большая склонность к хрупкому разрушению, ближе предельное состояние и т. п.

При испытании баллонов поверочным давлением никаких пластических деформаций в их стенках не должно быть, так как баллоны проектируются таким образом, чтобы напряжения в их стенках при таких испытаниях не превышали 85...90 % предела текучести для данной марки

стали [2]. Иногда задаются и коэффициентом запаса по пределу текучести для случая гидравлических испытаний, например, 1,1 [3]. Теоретически правильно сконструированный сосуд никогда не будет демонстрировать остаточного расширения после нагружения поверочным давлением, однако в силу различных отклонений геометрии и механических свойств возможны некоторые незначительные, но измеримые деформации, которые, как считается, не влияют на безопасность [4].

Предельное состояние баллона связывают с давлением, при котором происходит разгерметизация его корпуса – давлением разрушения баллона  $P_b$ . Отношение давления разрушения к рабочему является коэффициентом запаса прочности баллона  $n_b$  и оно должно быть не ниже установленного соответствующими НД [3, 5–8]. В некоторых случаях задаются коэффициентом запаса по отношению к поверочному давлению, например 1,6 [9].

В последние годы в ряде стран для вновь производимых баллонов, в частности, газовых, с целью повышения надежности такие испытания проводятся с определением коэффициента остаточного расширения  $K_{op}$ . По некоторым НД определение этого коэффициента является обязательным [4, 5], по другим, альтернативным [9, 10]. Также устанавливается предельно-допустимое значение коэффициента остаточного расширения  $[K_{op}]$ , при превышении которого баллон не допускается к эксплуатации. Обычно  $K_{op}$  равен 0,1 (10 %) и 0,05



(5 %) – в России [5]. Согласно требованиям Европейских норм [9], для вновь произведенных баллонов, прошедших окончательную термическую обработку, общее и остаточное расширение, если такие определяются, должны быть выбиты вместе с серийным номером баллона.

В США и Беларуси для дыхательных алюминиевых баллонов марки ZAL производства «Luxfer» и «Catalina», используемых для дайвинга, коэффициент остаточного расширения в обязательном порядке определяют и при переосвидетельствовании баллонов. Поверочное давление при этом равно 5/3 рабочего, а  $[K_{op}] < 10 \%$ . При периодической проверке бесшовных стальных газовых баллонов  $K_{op}$ , согласно [11], предлагается определять в альтернативном порядке. В Северной Америке и Европе для композиционных газовых баллонов с алюминиевым, стальным или неметаллическим лайнером при переосвидетельствовании  $[K_{op}] < 5 \%$  [12, 13].

Согласно Австралийскому стандарту [14], метод остаточного расширения используется и в полевых условиях для диагностики сомнительных участков газо- и нефтепроводов.

При назначении времени следующего переосвидетельствования баллонов с пропаном, согласно параграфов 173 и 180 раздела 49 Кодекса федеральных правил Департамента США (DOT CFR 49 173, и DOT CFR 49 180), используют дифференцированный подход. При поверочных испытаниях давлением срок проведения следующих испытаний через 7 лет. Если замеряется коэффициент остаточного расширения и при этом он оказывается меньше предельно допустимого – допускается эксплуатация до 12 лет. Если баллон осмотрен только визуально, без проведения гидроиспытаний, допустимый срок эксплуатации не более 5 лет.

Для некоторых типов баллонов, в частности, для дайвинга, на баллоне выбивается его максимально допустимое упругое расширение при поверочном давлении «REE» в миллилитрах. Если при проверке баллона его  $K_{op} < 10 \%$ , то баллон проходит гидроиспытания. И если при этом упругое расширение меньше максимально допустимого значения, то на баллоне после даты тестирования ставится знак «+», согласно требованиям и процедурам для тиснения знаков «+» и «\*», приведенным в работе [15] § 180.209 и § 173.34.

Расчет и назначение максимально допустимых значений для упругого расширения бесшовных баллонов приведен в рекомендациях Ассоциации сжатого газа [16], которые заключаются в том, чтобы при поверочном давлении не были превышены допустимые напряжения в стенке баллона. Максимально допустимые напряжения приведены в работе [15] § 173,302.

Согласно DOT CFR 49 173,302 баллоны, у которых  $K_{op}$  после гидроиспытаний меньше 0,1 и упругое расширение меньше предельно допустимого, могут заправляться давлением на 10 % больше рабочего.

Коэффициент остаточного расширения  $K_{op}$  определяется как отношение остаточного изменения объема баллона  $\Delta W_{ост}$  к полному его изменению под давлением  $\Delta W_{полн}$  (рис. 1) — он характеризует степень пластических деформаций в стенке баллона и является интегральным критерием надежности, часто выражается в процентах.

Преимущество метода испытаний на объемное расширение баллонов (ОРБ) перед методом простого нагружения поверочным давлением заключается в том, что он включает в себя выполнение всех требований, касающихся простого нагружения, и в отличие от него дает интегральную характеристику баллону как конструкции в целом. Иными словами он связывает геометрические характеристики баллона, включающие процент овальности, разнотолщинность и т. д. с пределом текучести материала и внутренним давлением в единое целое. Весьма незначительные деформации невозможно обнаружить визуально при простом нагружении поверочным давлением. Чем больше отклонение баллона от идеальной формы, тем большим будет коэффициент остаточного расширения при поверочном давлении.

Можно предполагать, что для вновь производимых баллонов процент остаточной объемной деформации будет тем больше, чем больше отклонение баллона от идеальной формы (овальность по наружному диаметру, разнотолщинность, изогнутость для цилиндрических баллонов и т. д.) и чем больше у него допускаемых нормативной документацией дефектов. Если эксплуатируемый баллон не претерпевает никаких изменений, то при последующей плановой проверке его остаточная объемная деформация должна равняться нулю.

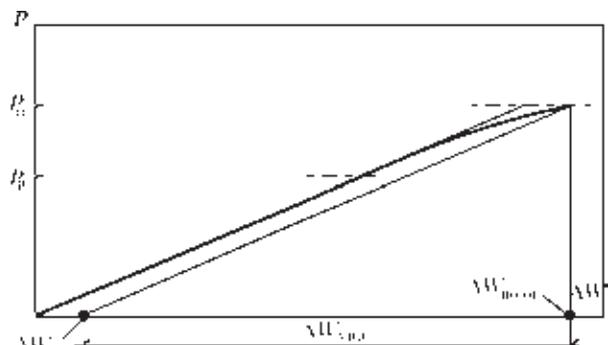


Рис. 1. Определение коэффициента остаточного расширения:  $P_p, P_n$  – рабочее и поверочное внутреннее давление;  $\Delta W_{полн}$  – полное изменение объема баллона, находящегося под поверочным давлением;  $\Delta W_{ост}$  – остаточное изменение объема баллона после сброса поверочного давления до нуля;  $\Delta W_{упр}$  – упругое изменение объема баллона при нагружении его поверочным давлением



Каких-либо данных о теоретическом расчете коэффициента остаточного расширения, о выборе предельнодопустимого его значения и его связи с другими параметрами, характеризующими геометрию, работоспособность и надежность баллонов, а также его механические свойства не имеется. Не оговариваются различия между допускаемым коэффициентом остаточного расширения для случая производства и для случая периодической поверки баллонов в процессе их эксплуатации. Также не удалось найти информацию, связанную с процессом накопления остаточного расширения при последующих периодических поверках.

Существует несколько альтернативных схем, по которым можно определять коэффициент остаточного расширения баллонов:

- схема водяной рубашки (используется для баллонов объемом до 260 л). Реализация этой схемы осуществляется погружением баллона в герметически закрываемую емкость, заполненную водой (водяную рубашку), и определением объема воды, вытесненной из водяной рубашки при расширении баллона под действием поверочного давления (полное изменение объема баллона) и объема воды, который не возвратился в водяную рубашку после снятия давления (остаточное изменение объема). Данная схема по сравнению с остальными отличается наибольшей точностью;

- схема прямого расширения (для больших сосудов). Определяется объем воды, закачанной в баллон для достижения поверочного давления, и объем воды, вытесненной из баллона при снижении давления до атмосферного. Остаточную объемную деформацию сосуда определяют по разности объемов воды с учетом ее сжимаемости при температуре окружающей среды;

- с использованием высокоточных весов (для баллонов малого объема). Определяется масса закачанной в баллон воды для достижения поверочного давления и масса воды, вытесненной из баллона при снижении давления до атмосферного. Остаточную объемную деформацию баллона определяют по разности массы воды с учетом ее сжимаемости при температуре окружающей среды.

Следует полагать, что самая высокая точность будет у первой схемы. Ею может быть охвачена и наиболее широкая номенклатура изделий. При испытаниях по остальным двум рассмотренным схемам используются коэффициенты поджатия воды и также возможны ее утечки внутри самого насоса. Разрешается использовать и другие методы, если они отработаны и дают приемлемую точность. Например, в последнее время практикуется схема замены бюретки на специально сконструированную чашу «Bowl» [17], которая устанавливается на весах.

Проведение испытаний по каждой схеме оговариваются специальными процедурами. Например, требования к испытаниям давлением по схемам водяной рубашки и прямого расширения содержатся в работе [15] § 180 и материалах Ассоциации сжатого газа [18]. Процедуры испытаний также оговариваются и в тех НД, где выдвигаются требования к оборудованию.

Первыми нормативными документами с использованием схем водяной рубашки и прямого расширения с указанием требований к оборудованию и методам испытаний являются [19, 20]. В этих документах также приведены и коэффициенты поджатия воды.

Приведенные выше схемы реализуются с помощью соответствующих установок, к которым выдвигаются определенные требования, касающиеся их конструкторского исполнения и точности [11, 20]. На мировом рынке представлены различные специализированные и универсальные стенды, позволяющие определять полную и остаточную объемную деформацию баллонов, некоторые стенды изготавливаются в промышленных масштабах. На некоторых стендах имеется возможность подключения и помещения в водяную рубашку одновременно нескольких баллонов, причем испытываются они последовательно.

При проведении испытаний на остаточное расширение оговариваются скорость нагружения, например, не более 1,0 МПа/с [5] и время выдержки под поверочным давлением (обычно 0,5 мин [9, 20] или 1 мин [5]). При определении полного и остаточного изменения объема баллона без использования водяной рубашки используют методики, описанные в работах [11, 13, 19–21], учитывающие эффект поджатия воды.

Компания «Hydro-Test Products, Inc» (США) промышленно производит широкий спектр оборудования, более 50 предложений, связанного с испытаниями на остаточное расширение различных типов баллонов ([www.hydro-test.com](http://www.hydro-test.com)). Эта компания занимается и подготовкой кадров по проведению испытаний на остаточное расширение баллонов.

Для поверки различных установок выпускаются калибровочные баллоны, которые должны давать четко определенные расширения при определенных давлениях (как правило, ряд точек с линейной зависимостью) и возвращаться в нуль. Погрешность определения изменения объема должна быть менее 1 % «Hydro-Test Products, Inc».

На рис. 2 приведены несколько установок для испытаний баллонов на остаточное расширение. Например, установка (рис. 2, в) оснащена комплексным программным обеспечением с графическим отображением давления и расширения. Используется для баллонов длиной от 900 до



2000 мм и диаметром от 110 до 410 мм. Производительность 40 баллонов за 8 ч. Доставка из Китая — 100 комплектов в месяц в течение 30 дней. Имеется и аналогичная установка SY-05 на 50 МПа.

Ориентировочный расчет времени, необходимый для выполнения всех операций двумя рабочими по освидетельствованию на установке (рис. 2, *з*) и окраске одного 40-литрового баллона — 4 ч 10 мин.

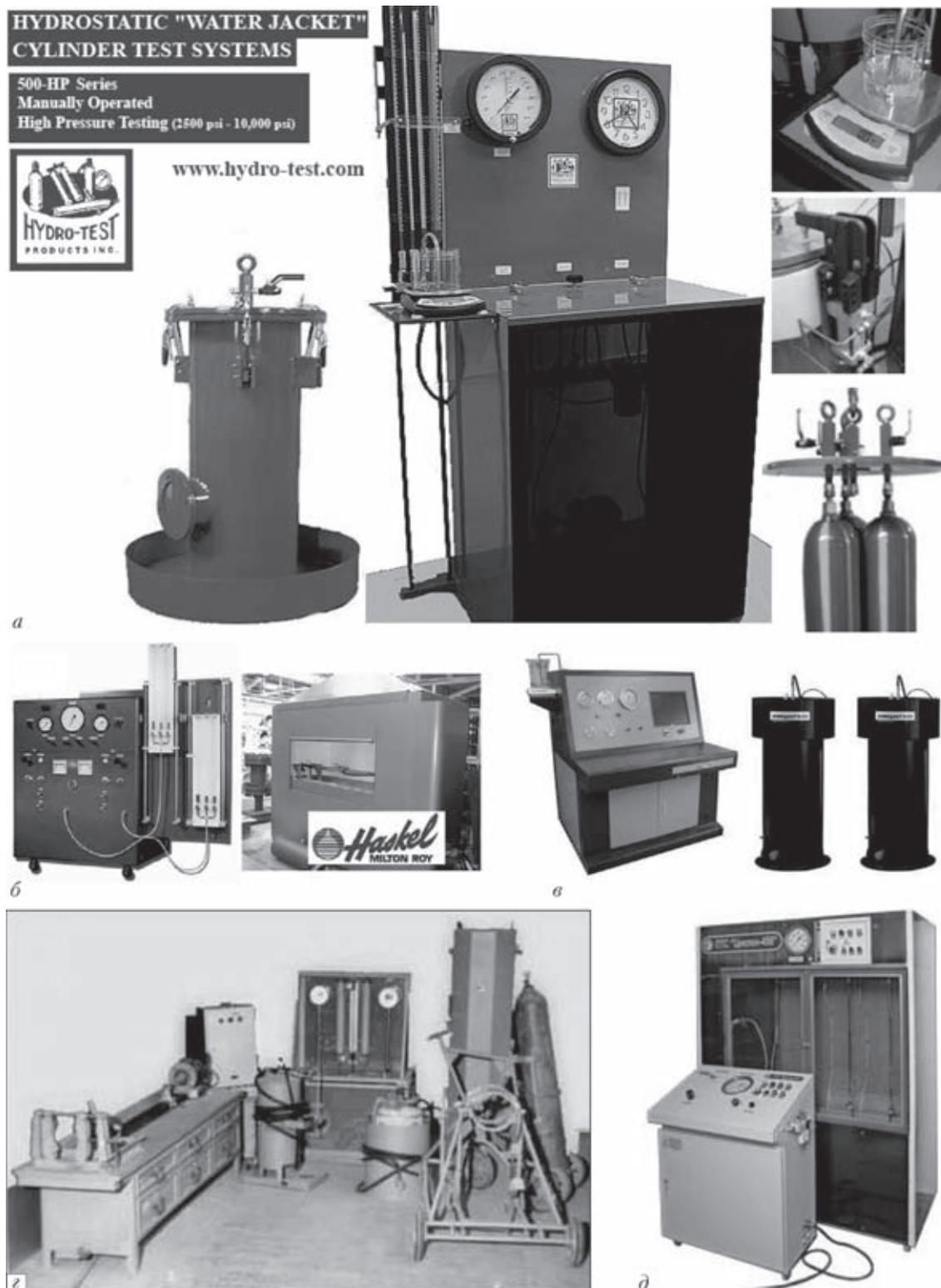


Рис. 2. Установки для гидравлических испытаний баллонов на остаточное расширение: *а* – установка серии 500-HP («Hydro-Test», США); *б* – широкопрофильный стенд для испытаний на ОРБ с водяной рубашкой («Haskel Energy Systems Limited», Великобритания); *в* – двухкамерная установка «водяная рубашка» SHINEEAST SY-04 на 70 МПа (Г. Шаньдун, Китай); *з* – установка для проверки и опрессовки сосудов высокого давления УПОС-1 (Кизлярский электромеханический завод); *д* – гидравлическая испытательная установка «Циклон 450» для испытаний баллонов от 2 до 10 л давлением до 45 МПа (ОАО «ПТС2» – объединение «Пожтехсервис», Москва)



Следует отметить гидравлическую испытательную установку «HTG 500» (ОАО «ПТС» – объединение «Пожтехсервис», Москва) для испытания стальных баллонов высокого давления до 50 МПа, с точностью определения объёмного расширения до 1 мл, а также стенд СТ-1 (ООО «Криокомплект», Москва) для освидетельствования и ремонта баллонов вместимостью 40 и 50 л с рабочим давлением до 19,6 МПа.

Метод ОРБ используется для огнетушителей и баллонов для технических газов: кислород, аргон, углекислота, ацетилен, азот и др. объемом 2...50 и более литров. В частности, используется для бесшовных стальных газовых баллонов [9, 11], бесшовных газовых баллонов из алюминиевых сплавов [10, 19, 22], стальных бесшовных и композиционных со стальным лейнером баллонов высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах. Также его можно использовать для баллонов, состоящих из неметаллического лейнера, оболочки из композиционного материала на всей поверхности лейнера и металлических закладных элементов, при этом  $K_{op}$  назначает разработчик [5]. Этот метод используется также для композитных газовых баллонов с алюминиевым, стальным или неметаллическим корпусом [12, 13]. Имеются сведения о проведении в США испытаний в водяной рубашке малолитражных пропановых баллонов, имеющих один кольцевой сварной шов [Discovery canal].

В целях защиты населения и снижения риска при эксплуатации баллонов высокого давления Департамент транспорта США (DOT) разработал федеральные правила CFR, раздел 49, для производства, проверки и транспортировки сосудов высокого давления [23]. В них указывается, что несоблюдение требований к гидравлическому оборудованию и методам испытаний влечет за собой крупные штрафы и тюремное заключение. Лица, фальсифицирующие проведение испытаний, в частности, баллонов для дайвинга, а также лица, проводящие необъективное тиснение кодов на баллонах, могут получить до пяти лет лишения свободы и/или штраф в размере \$ 25000, так как это является федеральным преступлением и представляет опасность для общества. Испытательные станции, которые не имеют точного оборудования, либо персонал которых не имеет соответствующих квалификационных удостоверений, могут быть оштрафованы на сумму от \$ 500 до \$ 11000 за каждое нарушение. Разработкой руководящих принципов проверки баллонов для промышленных и медицинских газов, а также обеспечением безопасности их эксплуатации с 1913 г. занимается Ассоциация сжатого газа (CGA).

После производства баллонов, согласно данным [21], при испытании контрольного баллона до разрушения определяют отношение приращения объема баллона в момент разрушения к первоначальному его объему, характеризующему неким образом запас пластичности.

Наряду с указанными выше названиями составляющих  $K_{op}$ , в НД также употребляются и другие:

- полное изменение объема (полная объемная деформация, полное объемное расширение, англ. TE - total expansion (общее расширение));

- остаточное изменение объема (остаточная объемная деформация, остаточное объемное расширение, PE – permanent expansion (постоянное расширение));

- упругое изменение объема (EE – elastic expansion (упругое расширение));

- максимально допустимое упругое расширение (REE – rejection elastic expansion).

Все указанные характеристики измеряются в миллилитрах.

### Выводы

Из изложенного выше становится понятным, что в отличие от подходов, принятых в Украине, за рубежом используют еще и более информационные критерии к оценке безопасности эксплуатации баллонов высокого давления. И эти дополнительные критерии незначительно усложняют процедуру освидетельствования. Целесообразность использования метода ОРБ к баллонам, эксплуатируемым в Украине, не должно вызывать сомнения по нескольким причинам.

В Украине эксплуатируется большой парк баллонов высокого давления и не секрет, что эти баллоны изготавливались по технологиям, уступающим европейским и американским по многим характеристикам [24, 25].

Многие баллоны эксплуатируются более 30 лет. В ряде случаев они находятся в нормальном состоянии и выдерживают поверочное давление. При более жесткой процедуре переосвидетельствования многие из них могут эксплуатироваться еще значительный срок.

Рассмотренные подходы к оценке надежности баллонов должны использоваться при допуске на рынки Украины баллонов, изготовленных за рубежом.

Испытание баллонов с определением  $K_{op}$  открывает дополнительные возможности по оценке их запаса прочности, о чем подробно будет изложено в последующих публикациях.

1. *ПБ 03-576-03*. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
2. *Полтев М. К.* Охрана труда в машиностроении: Уч. – М.: Высш. шк. 1980. – 294 с.



3. *ГОСТ Р 52857.1-2007*. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
4. *ECE/TRANS/WP.15/AC.1/2010/15*. Совместное совещание Комиссии экспертов МПОГ и рабочей группы по перевозкам опасных грузов. Предложения о внесении поправок в МПОГ/ДОПОГ/ВОПОГ (СМГС) в пункте 6.2.3.4.1. – Берн, 22-26 марта 2010 г. (Изменения, касающиеся [2]).
5. *ГОСТ Р 51753-2001*. Баллоны высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах.
6. *НПБ 190-2000*. Техника пожарная. Баллоны для дыхательных аппаратов со сжатым воздухом для пожарных. Общие технические требования. Методы испытаний.
7. *ГОСТ Р 53258-2009* Техника пожарная. Баллоны малолитражные для аппаратов дыхательных и самоспасателей со сжатым воздухом. Общие технические требования. Методы испытаний.
8. *ГОСТ Р ИСО 11439, ISO 11439:2000*. Газовые баллоны. Баллоны высокого давления для хранения на транспортном средстве природного газа как топлива. Технические условия.
9. *ISO 9809-1:2010(E)*. Gas cylinders – Refillable seamless steel gas cylinders – Design, construction and testing – Part 1: Quenched and tempered steel cylinders with tensile strength less than 1 100 MPa. (Газовые баллоны – Бесшовные стальные газовые баллоны многоразового использования – Проектирование, изготовление и испытания. Часть 1: Баллоны из закаленной и отпущенной стали с прочностью на растяжение менее 1100 МПа).
10. *ISO 7866:1999*. Gas cylinders – Refillable seamless aluminium alloy gas cylinders – Design, construction and testing. (This standard has been revised by: ISO 7866:2012). (Газовые баллоны – Бесшовные газовые баллоны из алюминиевого сплава многоразового использования. – Проектирование, изготовление и испытания. (Пересмотрен ISO 7866:2012)).
11. *ISO 6406:2005(E)*. Gas cylinders. Seamless steel gas cylinders. Periodic inspection and testing. (Газовые баллоны. Бесшовные стальные газовые баллоны. Периодическая инспекция и испытание).
12. *Guidance for the use, inspection, care and periodic Testing of sci composite cylinders*. Issue 5, July 2010. (Руководство по использованию, проверке, уходу и периодических испытаний баллонов из композитных материалов. Выпуск 5, июль 2010 г.).
13. *ISO 11623:2002*. Transportable gas cylinders – Periodic inspection and testing of composite gas cylinders. (Переносные газовые баллоны. – Периодические проверки и испытания композитных газовых баллонов).
14. *Australian standard AS/NZS 2885.5:2002 Pipelines – Gas and liquid petroleum: Part 5: Field pressure testing*. (Австралийский стандарт. Трубопроводы – газа и жидких нефтепродуктов: Ч. 5. Полевые испытания под давлением).
15. *DOT CFR 49 – U.S. Department of Transportation, Code of Federal Regulations*. (Департамент транспорта США (DOT), кодекс федеральных правил (CFR), раздел 49, для производства, проверки и транспортировки сосудов высокого давления).
16. *CGA C-5: Cylinder Service Life-Seamless Steel High Pressure Cylinders*. (Compressed Gas Association, pamphlet C-5). (Ассоциация сжатого газа, брошюра C-5: Баллоны. Срок службы бесшовных стальных баллонов высокого давления).
17. *FSS Fire System Services SA Pty Ltd. National Hydro Cylinder Testing Services* (Австралия).
18. *CGA pamphlet C-1-2009. Methods for pressure testing compressed gas cylinders*. (Методы испытания под давлением баллонов со сжатым газом).
19. *BS 5430-3:1990*. Periodic inspection, testing and maintenance of transportable gas containers (excluding dissolved acetylene containers). – Part 3: Specification for seamless aluminium alloy containers of water capacity 0.5 litres and above. (Периодическая проверка, испытания и обслуживание переносных газовых баллонов (за исключением баллонов растворенного ацетилена). Ч. 3. Спецификация для бесшовных баллонов из алюминиевых сплавов вместимостью 0,5 л и выше). Заменен на BS EN 1802:2002.
20. *GB 9251-88, GB/T 9251-1997 и GB/T 9251-2011*. Баллоны. Методы гидростатических испытаний газовых баллонов (Китай). (Относятся к бесшовным стальным и из алюминиевых сплавов газовым баллонам).
21. *GB 15385-94*. Баллоны. Методы испытания гидравлическим давлением до разрушения (Китай).
22. *BS EN 1802:2002*. Transportable gas cylinders. Periodic inspection and testing of seamless aluminium alloy gas cylinders. (Переносные газовые баллоны. Периодические проверки и испытания бесшовных газовых баллонов из алюминиевых сплавов).
23. *Bob Sheridan President of UDT International. Hydrostatic Cylinder Testing 101*.
24. *ГОСТ 949-73*. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P_p \leq 19,6$  МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>).
25. *Надежность и экономичность производимых в Украине баллонов высокого давления для технических газов / Э. Ф. Гарф, Р. И. Дмитриенко, А. А. Перепечай и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2012. – № 12. – С. 36–41.*

A brief review is given of the method of bottle testing by reference hydraulic pressure with determination of residual expansion coefficient. It is shown that re-examination procedure of high-pressure bottles in service, applied in Ukraine, cannot guarantee the required strength margin. To increase the reliability of new bottles, and, particularly, bottles in long-term service, over the recent years in a number of countries bottle testing procedure has included a procedure, envisaging determination of residual expansion coefficient. This coefficient is an integral characteristic of bottle technical condition. Its application is particularly important for bottles, made and operating in Ukraine, as in view of a number of features of manufacturing technology these bottles are known to be characterized by considerable difference in thickness, large scatter of mechanical properties and ratio of yield point to tensile strength slightly higher than 0.5. On the other hand, over the recent years foreign-made bottles are becoming ever wider accepted in the Ukrainian market. Their manufacturing technology is such that difference in thickness is practically eliminated, and steels used for bottle manufacturing have high mechanical properties. In such a situation monitoring bottle reliability is required, both at their delivery and in service. Here an important parameter is limit admissible value of the coefficient of residual expansion at trial pressure. References 27, Figures 2.

*Keywords*: bottles, examination, strength margin, residual expansion, water jacket, deformation, inner pressure, volume change, testing

Поступила в редакцию  
07.10.2013



# СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА ЦИНКА И ОКСИДНЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Е. Ф. ВОРОНКИН

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

Показана возможность получения дисперсных сцинтилляторов большой площади для дефектоскопии сварных швов труб или дефектоскопии изделий сложной формы, полученных методом литья, взамен рентгеновской пленки на основе селенида цинка, а также исследована возможность получения двухкомпонентных сцинтилляционных экранов на основе ZnSe(Te) и других сцинтилляторов ( $CdWO_4$ ,  $ZnWO_4$ , GSO, LGSO), характеризующихся максимумом люминесценции в области фотопоглощения селенида цинка. Приведены экспериментальные данные о влиянии добавок оксидных сцинтилляторов на спектры радиолюминесценции образцов и на поглощение рентгеновского излучения сцинтилляционными экранами на основе халькогенидного сцинтиллятора селенида цинка. Определен оптимальный размер частиц неорганического сцинтиллятора ZnSe(Te) для получения максимально высоких сцинтилляционных параметров в сцинтилляционных экранах. Разработана методика получения сцинтилляционных экранов на основе мелкодисперсных порошков ZnSe(Te), имеющих стабильные и равномерные сцинтилляционные характеристики по площади образцов. Библиогр. 13, табл. 2, рис. 6.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, сцинтилляционные экраны, дефектоскопия сварных швов

Сцинтиллятор ZnSe(Te) относится к классу полупроводниковых материалов группы  $A_2B_6$  и широко применяется в рентгеновских детекторах типа сцинтиллятор-фотодиод для современных многоканальных низкоэнергетических радиационных средств визуализации скрытого изображения (системы неразрушающего контроля (НК), медицинская томография, радиография) [1]. Сцинтилляционные кристаллы селенида цинка характеризуются высоким квантовым выходом (60 тыс. фотон/МэВ), максимум люминесценции в красной области спектра оптимален для регистрации кремниевым фотоприемником, время высвечивания и уровень послесвечения позволяют регистрировать теневое изображение биологических объектов в реальном режиме времени [2].

В некоторых областях радиационного приборостроения фотоприемники имеют не только линейную конфигурацию, но и сложный профиль. К примеру, в медицинской рентгенографии существуют сферические ПЗС-матрицы для томографов, в области радиационной дефектоскопии разработаны фотоприемники сложного профиля для исследования изделий такого же профиля (дефектоскопия сварных швов труб или дефектоскопия изделий сложной формы, полученных методом литья). Такая оптимизация конечной формы фотоприемника позволяет получать наиболее полную информацию об исследуемом объекте. Для эффективной регистрации рентгеновского излучения и во избежание искажения информации об объекте сцинтиллятор должен точно повторять форму фо-

топриемника и наиболее удачным решением этой задачи является гибкая сцинтилляционная панель, которая максимально плотно прилегает к поверхности фотоприемника любого профиля и может стать альтернативой фотопленки.

В настоящее время в качестве сцинтилляционных материалов для изготовления сцинтилляционных панелей, рентгеновских усиливающих экранов и других дисперсных сцинтилляторов в мире широко используются  $Gd_2O_2S:Tb$ , CsI:Na, CsI:Tl, NaI:Tl, ZnS:Cu, (Zn, Cd)S:Cu, (Zn, Cd)S:Ag,  $CdWO_4$ ,  $Bi_4Ge_3O_{12}$  (BGO),  $(Y,Gd)_2O_3:Eu^{3+}$  (Pr),  $Gd_2O_2S:Pr(Ce, F)$  и др. [3]. Наиболее часто применяемым материалом для изготовления дисперсных сцинтилляторов различного назначения является  $Gd_2O_2S:Tb$  [4]. В табл. 1 представлены сравнительные данные сцинтилляционных характеристик ZnSe(Te) и  $Gd_2O_2S(Tb)$ , из которых следует, что селенид цинка не уступает по своим характеристикам  $Gd_2O_2S:Tb$ , а по некоторым параметрам и превосходит его (конверсионная эффективность, послесвечение). В дисперсном виде сцинтиллятор на основе ZnSe(Te) не ограничен по площади и имеет на порядок более высокую равномерность люминесценции, чем кристаллический образец [5–10]. Возможность получения кристаллических образцов ZnSe(Te) большой площади технологически ограничена, причем с увеличением площади кристалла равномерность люминесценции ухудшается вследствие сегрегации легирующих добавок в кристалле при их выращивании.

В настоящей работе представлены характеристики экспериментальных образцов гибких



Таблица 1. Сцинтилляционные и физические характеристики сцинтилляторов  $Gd_2O_2S(Tb)$  и  $ZnSe(Te)$

Параметр	Сцинтиллятор	
	$Gd_2O_2S(Tb)$	$ZnSe(Te)$
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	7,3	5,42
Эффективный атомный номер $Z$	60	33
Световой выход, фотоны/МэВ	60 000	60 000
Максимум излучения $\lambda_{max}$ , нм	545	640
Конверсионная эффективность, %	19	до 22
Послесвечение (после 6 мкс), %	1	<0,05
Гигроскопичность	Нет	Нет
Химическая стабильность	Неограниченная	Неограниченная
Механическая и термическая стойкость	Хорошая	Хорошая
Радиационная стойкость	-"	-"

сцинтилляционных панелей, изготовленных на основе мелкодисперсных порошков  $ZnSe(Te)$ , а также ряда оксидных сцинтилляторов, таких как  $CdWO_4$ ,  $ZnWO_4$ , GSO, LGSO. Цель работы заключалась в получении дисперсных сцинтилляционных панелей большой площади, имеющих высокий квантовый выход и равномерность люминесценции. Также в работе исследовали возможность увеличения светового выхода основного сцинтиллятора (селенид цинка) в двухкомпонентных системах за счет введения дополнительного сцинтилляционного материала, характеризующегося максимумом люминесценции в области фотопоглощения селенида цинка.

**Эксперимент.** Объектами исследования были однокомпонентные и двухкомпонентные сцинтилляционные панели, выполненные в виде слоя поликристаллических частиц неправильной геометрической формы неорганических сцинтилляторов в оптической иммерсионной среде – силиконовый каучук. Образцы панелей изготовлены методом полива смеси порошок сцинтиллятора/иммерсионная среда в форму, покрытую антиадгезивным материалом.

В рамках данной работы были изготовлены однокомпонентные и двухкомпонентные образцы сцинтилляционных панелей на основе различных сцинтилляторов ( $ZnSe(Te)$ ,  $CdWO_4$ ,  $ZnWO_4$ , GSO, LGSO) с различными процентными соотношениями компонент в образцах. Спектры радиолюминесценции полученных образцов были сняты с помощью монохроматора МДР-23 с АЦП преобразователем сигнала и фотодетектором ФЭУ-80, в качестве источника ионизирующего излучения использовали  $^{241}Am$  с энергией квантов порядка 60 кэВ. Измерения интенсивности светового выхода образцов осуществлялось по известной методике при помощи установки по измерению светового

выхода и послесвечения – «Smiths Heimann AMS-1».

**Результаты и обсуждение.** Для оптимизации сцинтилляционных параметров сцинтилляционных панелей определили зависимость светового выхода панелей от размера частиц сцинтиллятора  $ZnSe(Te)$  и толщины экрана (рис. 1). Зависимость светового выхода  $ZnSe(Te)$  от дисперсности частиц определяется степенью поглощения частицами рентгеновского излучения. Чем крупнее частица, тем больший процент рентгеновского излучения будет поглощен, следовательно, интенсивность люминесценции растет при увеличении размера частиц.

Согласно рис. 1 наибольшую интенсивность имеют частицы с дисперсностью 200...600 мкм. Если двигаться в сторону уменьшения размера частиц, то интенсивность люминесценции падает, причем при достижении определенного размера (около 30 мкм) люминесценция становится очень низкой. Это связано с длиной пробега электрона в данном материале и если она становится больше размера частиц, то лишь незначительная часть рентгеновского излучения поглощается в материале и индуцирует люминесценцию. К ослаблению люминесценции при уменьшении размера частиц приводят также диссипативные свойства среды дисперсного сцинтиллятора (рассеяние и перепоглощение испущенных квантов люминесценции). Оптимальная толщина образцов сцинтилляционных панелей для достижения максимального уровня квантового выхода при дисперсности частиц 40...120 мкм составля-

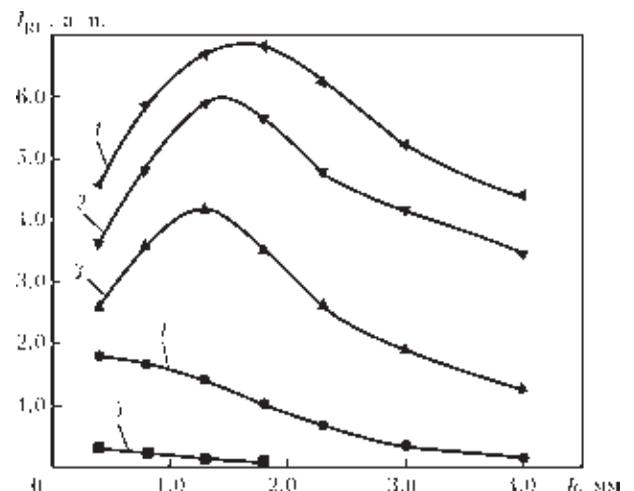


Рис. 1. Зависимость уровня светового выхода сцинтилляционных панелей на основе  $ZnSe(Te)$  от размера частиц поликристаллического порошка и толщины образца: 1 – образец панели с диаметром частиц порошка 200...600 мкм; 2 – 120...200; 3 – 40...120; 4 – 25...40; 5 – 1...25



ет 1,0...1,5 мм, для 120...200 мкм – 1,3...1,8 мм и 200...600 мкм – 1,5...2,0 мм. При толщине панели больше оптимальной рентгеновское излучение поглощается в верхнем слое образца и его интенсивность в нижних слоях образца недостаточна для возбуждения максимального уровня люминесценции, а кванты люминесценции из верхних слоев не достигают фотоприемника и выделяются в виде тепловой энергии. При толщине панели меньше оптимальной количества сцинтилляционного материала в образце недостаточно для получения максимального уровня люминесценции. Для образцов панелей более мелких фракций оптимальная толщина экрана уменьшается.

Относительный световой выход кристаллических и дисперсных образцов сцинтилляторов на основе ZnSe(Te) представлен на рис. 2. Сцинтилляционные панели, выполненные из наиболее крупной фракции порошка селенида цинка – 200...600 мкм – по уровню светового выхода приближаются к кристаллическому образцу (до 95 % светового выхода кристалла). При уменьшении размера частиц световой выход падает (согласно приведенным ранее разъяснениям) и для частиц с дисперсностью 120...200 мкм составляет около 80 %, для частиц 40...120 – до 55 % и 25...40 мкм – до 30 %. Частицы наименьшей дисперсности не имеют практического интереса за счет крайне низкого светового выхода – до 10 %. Сравнение светового выхода проводится с кристаллическими образцами тех же типоразмеров как и сцинтилляционные панели.

Для определения возможности увеличения светового выхода основного сцинтиллятора (селенид цинка) за счет введения дополнительного сцинтилляционного материала, имеющего максимум люминесценции в области фотопоглощения ос-

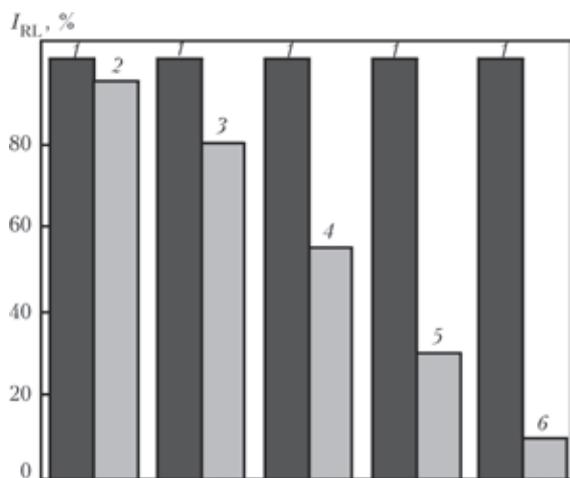


Рис. 2. Сравнительные величины светового выхода дисперсного и монолитного кристаллического сцинтилляторов одинаковых типоразмеров на основе ZnSe(Te): 1 – монолитный кристаллический сцинтиллятор; 2–6 – дисперсный сцинтиллятор (2 – частицы 200...600 мкм; 3 – 120...200; 4 – 40...120; 5 – 25...40; 6 – 1...2)

новного сцинтиллятора и для применения технологии изготовления сцинтилляционных панелей на других сцинтилляционных материалах, изготовлены однокомпонентные и двухкомпонентные сцинтилляционные панели на основе ZnSe(Te), CdWO<sub>4</sub>, ZnWO<sub>4</sub>, GSO и LGSO. Спектры радиолюминесценции таких сцинтилляционных панелей показаны на рис. 3 и 4. В двухкомпонентных системах в зависимости от соотношения селенида цинка и дополнительного сцинтиллятора наблюдается перераспределение интенсивности люминесценции образцов и изменение вида спектров люминесценции, согласно интенсивности и спектральной области люминесценции каждой компоненты панели. Максимальную интенсивность люминесценции имеют однокомпонентные панели на основе селенида цинка. Увеличения интенсивности люминесценции за счет фотовозбуждения ZnSe(Te) не наблюдается. Суммарный световой выход у двухкомпонентных образцов ниже, чем

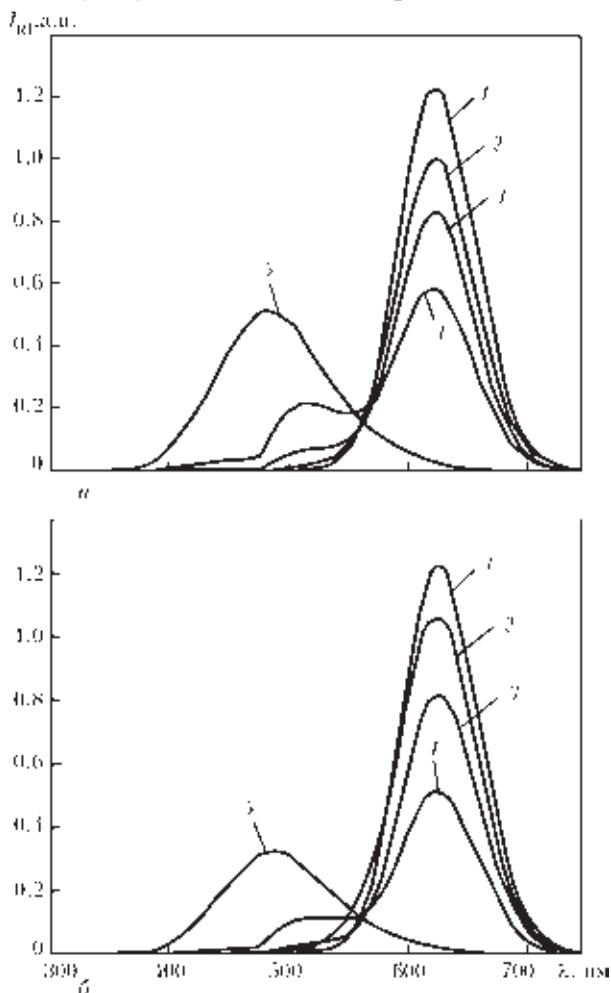


Рис. 3. Спектры радиолюминесценции образцов сцинтилляционных панелей на основе ZnSe(Te), CdWO<sub>4</sub>, ZnWO<sub>4</sub> при разных концентрациях компонент в панелях: а – ZnSe(Te) + CdWO<sub>4</sub>; б – ZnSe(Te) + ZnWO<sub>4</sub> (кривые 1 соответствуют образцам на основе ZnSe(Te); для а – 2–4 соответствуют концентрациям CdWO<sub>4</sub>/ZnSe(Te) – 1:3, 1:1, 3:1, 5 – CdWO<sub>4</sub>; для б – 2–4 соответствуют концентрациям ZnWO<sub>4</sub>/ZnSe(Te) – 1:3, 1:1, 3:1; 5 – ZnWO<sub>4</sub>)

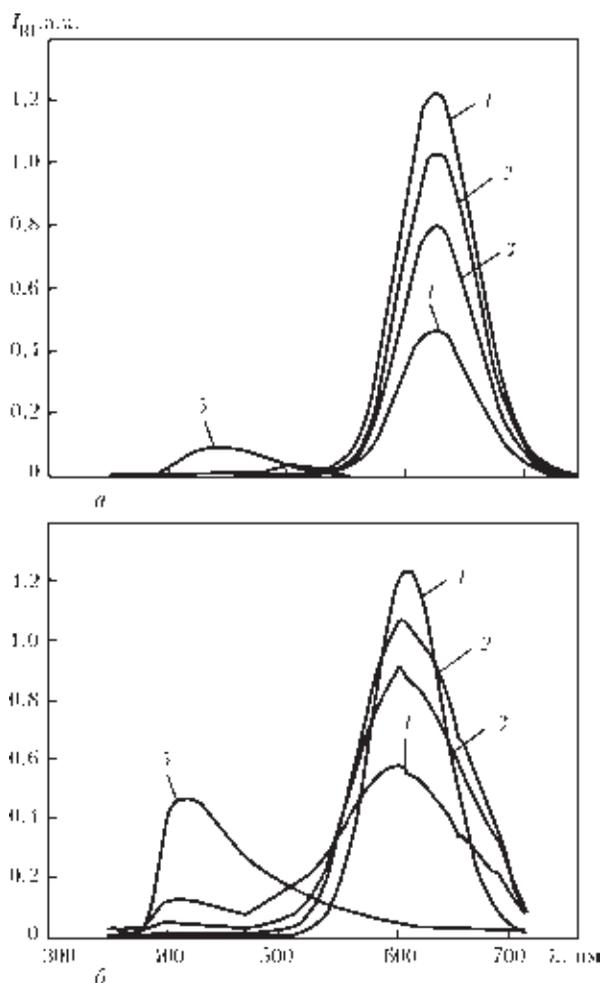


Рис. 4. Спектры радиолюминесценции образцов сцинтилляционных панелей на основе ZnSe(Te), GSO и LGSO при разных концентрациях компонент в панелях: *a* – ZnSe(Te) + GSO:Ce; *б* – ZnSe(Te) + LGSO:Ce (*1* соответствуют образцам на основе ZnSe(Te); для *a* – 2–4 соответствуют концентрациям GSO/ZnSe(Te) – 1:3, 1:1, 3:1; 5 – GSO; для *б* – 2–4 соответствуют концентрациям LGSO/ZnSe(Te) – 1:3, 1:1, 3:1; 5 – LGSO)

у однокомпонентных на основе селенида цинка, что можно связать с существенной разницей световых выходов селенида цинка и дополнительных сцинтилляторов. Также специфика дисперсной среды препятствует эффективному переносу энергии от дополнительного сцинтиллятора к основному. При попытке увеличить процентное соотношение основной/дополнительный сцинтиллятор фотовозбуждение селенида цинка не компенсирует потери светового выхода панели за счет уменьшения процентной доли основного сцинтиллятора в образце, что и приводит к уменьшению суммарного светового выхода.

Зависимость интенсивности люминесценции однокомпонентных и смешанных панелей на основе селенида цинка и вольфраматов цинка или кадмия от энергии квантов рентгеновского излучения показана на рис. 5. Сцинтиллятор ZnSe(Te) имеет абсолютный световой выход на уровне примерно 60 000 фотон/МэВ, абсолютный свето-

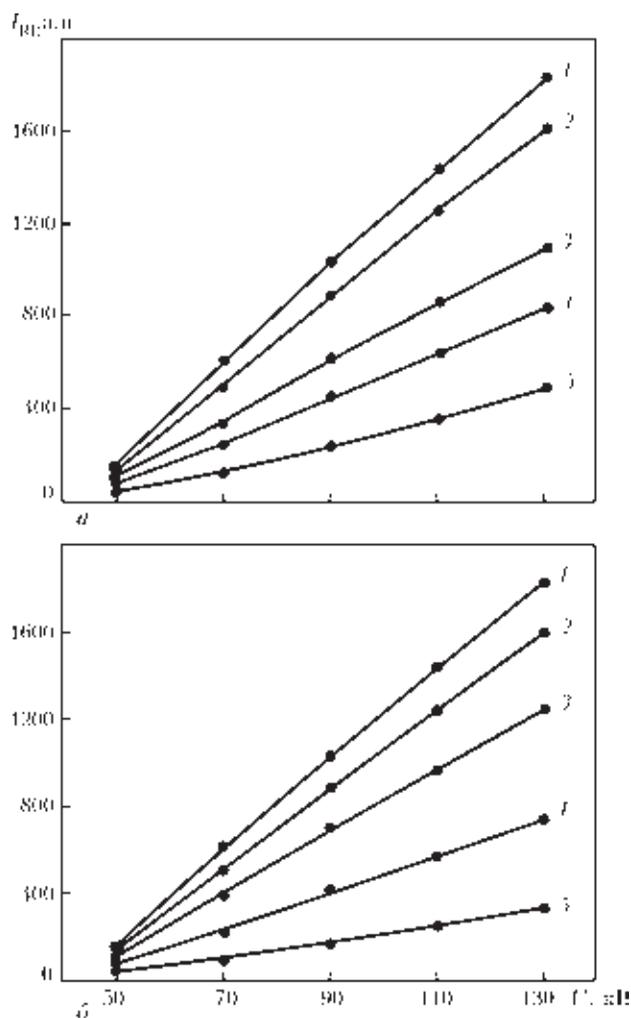


Рис. 5. Зависимость интенсивности радиолюминесценции образцов сцинтилляционных панелей на основе ZnSe(Te), CdWO<sub>4</sub>, ZnWO<sub>4</sub> от напряжения на рентгеновской трубке (напряжение варьируется в пределах от 50 до 130 кВ): *a* – ZnSe(Te) + CdWO<sub>4</sub>; *б* – ZnSe(Te) + ZnWO<sub>4</sub> (кривые *1, б* соответствуют образцам на основе ZnSe(Te); для *a* – 2–4 соответствуют концентрациям CdWO<sub>4</sub>/ZnSe(Te) – 1:3, 1:1, 3:1, 5 – CdWO<sub>4</sub>; для *б* – 2–4 соответствуют концентрациям ZnWO<sub>4</sub>/ZnSe(Te) – 1:3, 1:1, 3:1, 5 – ZnWO<sub>4</sub>)

выход CdWO<sub>4</sub> и ZnWO<sub>4</sub> составляет около 22 000 фотон/МэВ. Таким образом, анализируя полученные экспериментальные данные, наблюдаем линейную зависимость изменения интенсивности люминесценции двухкомпонентных образцов относительно интенсивности люминесценции однокомпонентных образцов пропорционально соотношению селенида цинка и вольфраматов. Интенсивность люминесценции панелей растет при увеличении энергии квантов рентгеновского излучения за счет повышения процента конверсии рентгеновского излучения.

Данные о поглощении рентгеновского излучения однокомпонентными и двухкомпонентными образцами сцинтилляционных панелей приведены на рис. 6. Степень поглощения рентгеновского излучения двухкомпонентных образцов аддитивная величина и определяется процентным соотноше-

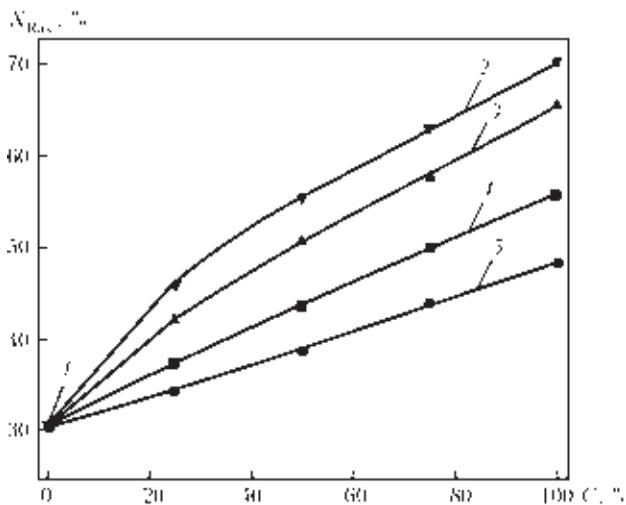


Рис. 6. Данные поглощения рентгеновского излучения двухкомпонентными и однокомпонентными сцинтилляционными панелями (напряжение на рентгеновской трубке 140 кВ). Точка 1 соответствует панели на основе ZnSe(Te); 2 – CdWO<sub>4</sub>; 3 – ZnWO<sub>4</sub>; 4 – GSO:Ce; 5 – LGSO:Ce, остальные точки соответствуют промежуточным концентрациям компонентов смешанных сцинтилляционных панелей ( $X_{Ray}$  – поглощение)

нием компонент в смешанной системе. Благодаря более высокому эффективному атомному номеру оксидные сцинтилляторы имеют более высокие коэффициенты поглощения рентгеновского излучения, чем селенид цинка. Соответственно добавки таких сцинтилляторов приводят к увеличению доли поглощенного рентгеновского излучения в образцах двухкомпонентных сцинтилляционных экранов.

Для практического применения сцинтилляционных панелей необходимо обеспечить равномерность люминесценции по площади панели. Измерение равномерности люминесценции по площади кристаллических и дисперсных образцов одинаковых типоразмеров на основе селенида цинка показало, что дисперсный сцинтиллятор характеризуется примерно в 6-7 раз большей равномерностью люминесценции (табл. 2). Это достигается гомогенизацией порошка ZnSe(Te) в процессе его приготовления и равномерным распределением его по площади панели.

Таблица 2. Сцинтилляционные и физические характеристики дисперсных и кристаллических сцинтилляторов на основе ZnSe(Te)

Параметр	Кристалл ZnSe(Te)	Сцинтилляционная панель ZnSe(Te)
Неравномерность люминесценции по площади образца, %	30	5
Площадь рабочей поверхности образца, см <sup>2</sup>	25	400
Механические характеристики	Хрупкий Твердый	Упругий Гибкий

Сцинтилляционные панели, полученные в процессе исследований, могут быть применены в рентгеновской интроскопии, спектрометрии и дозиметрии ионизирующих излучений средних и малых энергий [11–13]. К примеру, порошковые сцинтилляторы могут быть применены вместо кристаллических образцов в 16, 32, 62 и 128 элементных кремниевых фотодиодах, имея за счет своей дисперсности меньшее взаимовлияние по каналам фотодиода, чем кристаллический аналог. Другой областью применения панелей на основе ZnSe(Te) может выступить рентгенография внутренних органов (в частности, сердечной мышцы). Селенид цинка, имея более высокое быстродействие чем широко распространенный оксисульфид гадолиния, за счет низкого послесвечения позволяет получить более четкую картину движущихся объектов и, соответственно, более качественно произвести диагностику заболеваний сердца. Селенид цинка является низкоэнергетическим сцинтиллятором и при применении импульсного рентгеновского излучения, синхронизированного с фазами работы сердца, вместо непрерывного воздействия есть возможность существенного снижения лучевой нагрузки на пациента.

### Выводы

Разработана методика получения дисперсных сцинтилляционных панелей большой площади на основе быстродействующего люминофора ZnSe(Te), характеризующихся высоким квантовым выходом и равномерностью люминесценции.

Определены размеры частиц и толщина композитного слоя сцинтиллятора ZnSe(Te), обеспечивающие высокий квантовый выход и удовлетворительное пространственное разрешение для рентгеновского излучения с напряжением на аноде 50...130 кВ.

Установлен характер влияния добавок оксидных сцинтилляторов на спектры радиoluminesценции образцов и на поглощение рентгеновского излучения люминесцентными экранами на основе халькогенидного сцинтиллятора селенида цинка, что дает возможность варьировать оптические и люминесцентные параметры получаемых экранов в широком диапазоне.

1. Рюдигер Ю. Г. О применении синей и зеленой систем визуализации изображения в рентгенографии // Медицинская техника. – 2004. – № 6. – С. 32–36.
2. Трансформация дефектной структуры кристаллов селенида цинка под воздействием водорода / В. Д. Гальчицкий, Н. Г. Рыжиков, К. А. Старжинский и др. // Вopr. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2005. – 88, № 5. – С. 58–62.
3. Carel W. E van Eijk. Inorganic scintillators in medical imaging // Physics in medicine and biology. – 2002. – № 47. – P. 85–88.



4. *Ананьева Г. В., Горохова Е. И., Демиденко В. А.* Оптические свойства керамики на основе  $Gd_2O_3S$  // Оптический журнал. – 2005. – № 72(1). – С. 68–72.
5. *Pat. 1512339* Украина G01T 1 / 20. Детектор рентгеновского и мягкого гамма-излучений // Квитницкая В.З. и др. – 1988.
6. *Pat. 4362946* США G01T 1 / 164 Distributed phosphor scintillator structures / Dominic A. Cusano and others. – 1982.
7. *Pat. 1075726* Украина. Сцинтилляционный материал // Рыжиков В.Д. и др. – 1981.
8. *Pat. 7081627* US. Image detector for X-ray radiation // Bjoern Heismann and others. – 2006.
9. *Pat. 4138361* US. Radiation-conversion screens // Andre R. Suys and others. – 1979.
10. *Pat. 5411806* US. Method for the manufacture of a phosphor screen and resulting article // John C. Dahlquist. – 1995.
11. *Гурвич А. М.* Рентгенолюминофоры и рентгеновские экраны. – М.: Атомиздат, 1976. – С. 63.
12. *Блинов Н. Н.* Стандартизация технических условий выполнения рентгенологических исследований / Медицинская рентгенология / Под ред. Р. В. Ставицкого. – М.: МНПИ, 2003. – С. 28.
13. *Гурвич А. М.* Физические основы радиационного контроля и диагностики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 35.

Possibility of producing large-area disperse scintillators for flaw detection in pipe welds or flaw detection in cast complex-shaped items, instead of zinc selenide based X-Ray film, was demonstrated, and possibility of producing two-component scintillation shields based on ZnSe(Te) and other scintillators ( $CdWO_4$ ,  $ZnWO_4$ , GSO, LGSO), characterized by luminescence maximum in the field of zinc selenide photoabsorption, was studied. Experimental data are given on the influence of oxide scintillator additives on radioluminescence spectra of samples and on X-Ray radiation absorption by scintillation screens based on zinc selenide chalcogenide scintillator. Optimum size of particles of inorganic scintillator ZnSe(Te) was determined to produce maximum high scintillation parameters in scintillation screens. A procedure was developed to produce scintillation screens based on finely-dispersed ZnSe(Te) powders having stable and uniform scintillation characteristics over sample area. References 13, Tables 2, Figures 6.

*Keywords: nondestructive testing, scintillation screens, weld flaw detection.*

Поступила в редакцию  
04.07.2013

### ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

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

Заказы на книги можно оформить на сайте издательства либо направив запрос в редакцию журнала ТД и НК.



**СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ** / Составители: В.М. Илюшенко, Е. П. Лукьянченко. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с. Мягкий переплет, 165x235 мм. Сборник включает основные публикации — статьи, доклады, информационные материалы и изобретения в области сварки и наплавки меди и ее сплавов за период с 1953 по 2013 гг., авторами которых являлись в основном сотрудники Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. В представленных материалах освещен широкий круг вопросов разработки прогрессивных технологических процессов сварки и наплавки этих материалов и опыт их производственного применения в различных отраслях промышленности. Сборник может быть полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства, а также специалистам, развивающим исследования в этой области. ISBN 978-966-96309-1-9.



**ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ.** В.Н. Сидоренко, И.В. Пенгетов. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с. Твердый переплет, 165x235 мм. Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы. Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам. ISBN 978-966-96309-0-2.



**МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.** - Киев: Академперіодика, 2012. - 526 с. Мягкий переплет, 200x290 мм. Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее, преимущественно в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов. Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением металлургии дуговой сварки, разработкой сварочных материалов и технологий их производства.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ДЕФЕКТАМИ В КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАХ

Д. Е. ОКСЕНЬ, Е. И. ОКСЕНЬ

Автомоб. дорожный ин-т Донецкого нац. техн. ун-та. 84646, Украина, г. Горловка, ул. Кирова, 51.

E-mail: inst@adidonntu.org.ua

Рассмотрены вопросы повышения эффективности диагностирования системы крепления корпуса и механизмов двигателей внутреннего сгорания путем определения отклика виброакустического поля на внешних поверхностях корпусных деталей для проведения стендовых испытаний. Выполнены экспериментальные исследования влияния дефектов подвески и механизмов двигателей внутреннего сгорания на распределение виброакустической энергии по внешним поверхностям корпусных деталей. Методология исследования заключается в фиксации колебаний поверхности корпусных деталей как отклика совокупности всех колебательных процессов, протекающих в двигателях при стационарных режимах работы и построении так называемой виброакустической карты. Точные координаты максимумов концентрации энергии могут быть определены привязкой виброакустической карты к топологии корпуса двигателя, что может быть использовано для локализации дефектов механизмов и систем во время технической диагностики. Метод виброакустических карт рекомендуется для практического использования при диагностировании двигателей внутреннего сгорания и других сложных технических систем. Библиогр. 8, рис. 4.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, дефект, диагностика, виброакустическая эмиссия, виброакустическое поле, виброакустическая карта

Диагностирование технических систем, состоящих из целого ряда механизмов с подвижными звеньями, является сложной задачей. При оценке технического состояния таких систем основной проблемой является локализация возможных дефектов. Обеспечив эффективный контроль вибрационных процессов, возникающих во время работы машин и механизмов, можно выявить неисправности на самых начальных стадиях развития. Это позволит не только предотвратить возникновение аварийных ситуаций, но и значительно снизить затраты на устранение неисправностей, так как данная методика не требует разборки диагностируемого механизма [1,2].

Таким образом, тема, направленная на исследование процесса излучения двигателем внутреннего сгорания (далее ДВС или двигатель) вибрационных волн, вызванных динамическим взаимодействием его кинематических звеньев с целью выявления особенностей, свидетельствующих о наличии дефектов в механизмах и деталях, актуальна [3].

Ранее были проведены исследования, направленные на разработку методики оценки ресурса кинематических пар механизмов двигателя по энергии сигналов акустической эмиссии на основе критерия мощности амплитуд сигнала. Авторы предлагают осуществлять диагностирование технического состояния кинематических пар двигателя путем цифровой фиксации сигналов виброакустической эмиссии, возникающих при его работе [4, 5].

Данные исследования создают предпосылки для углубленного изучения влияния дефектов подвески и механизмов двигателя на распределение энергии колебаний во внешних поверхностях корпусных деталей.

Цель работы – повышение эффективности диагностирования системы крепления корпуса и механизмов ДВС путем определения отклика виброакустического поля на внешних поверхностях деталей ДВС для проведения стендовых испытаний.

Объект исследования – процесс излучения двигателем виброакустических волн, вызванных динамическим взаимодействием его кинематических звеньев.

Задача работы – экспериментальные исследования влияния дефектов подвески и механизмов ДВС на распределение виброакустической энергии по внешним поверхностям корпусных деталей.

**Разработка методики и аппаратуры.** В данной работе под виброакустической картой (ВАК) понимается набор значений величин параметров колебательных процессов и упругих деформаций для всех точек тела. При построении ВАК использован массив данных, полученный последовательной установкой преобразователя виброакустической эмиссии на поверхность корпуса ДВС по решетке 7×7 с шагом 7 см. Полученные отрезки данных синхронизированы по сигналу с датчика угловой скорости. Эксперимент проводили на двигателе автомобиля ВАЗ-21011, а измерения – на специально разработанной экспериментальной

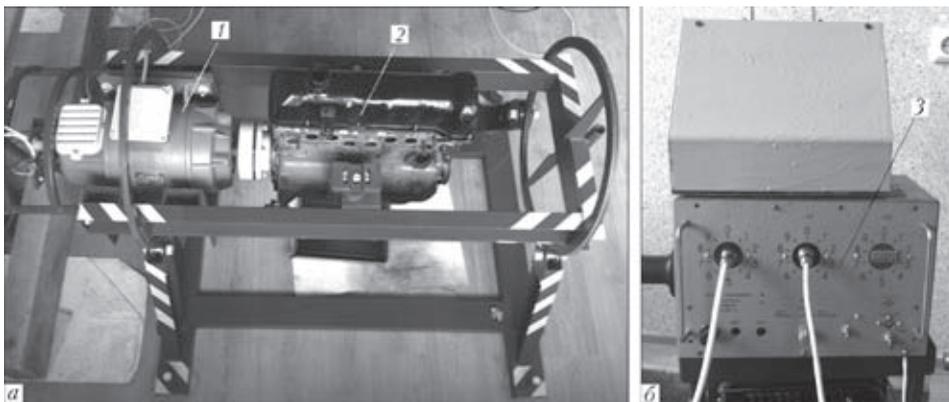


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – стенд; б – панель управления (обозначения см. в тексте)

установке, состоящей из электродвигателя 1, ДВС – 2 и панели управления 3 (рис. 1). Одновременно фиксировались два параметра – виброакустические колебания корпусных деталей и угловая скорость вращения коленчатого вала ДВС.

Методология исследования заключается в фиксации колебаний поверхности корпусных деталей как отклика совокупности всех колебательных процессов, протекающих в ДВС в стационарных режимах работы. Процесс измерений включает следующие этапы: разбивку исследуемого участка поверхности ДВС на прямоугольную сетку с постоянным шагом и фиксацию значения величин отклика в узлах измерительной сетки.

Фиксацию сигналов виброакустических колебаний корпусных деталей выполняли пьезоэлектрическим широкополосным преобразователем виброакустической эмиссии 3 (рис. 2). Пьезоэлектрические сигналы были нормализованы при помощи четырехканального усилителя заряда 2 модели СА-2614 и подавались на модуль аналого-цифрового преобразователя 4 модели ADA-1406. Угловая скорость фиксировалась аналоговым датчиком на основе генератора постоянного тока. Запись сигналов вели при помощи компьютера 1.

Дальнейшую обработку полученных данных выполняли на основе предположения, что характер колебания всех деталей ДВС цикличен в соответствии с тактами рабочего процесса и неизменно повторяется для каждого последующего

цикла. Для анализа использовали фрагменты сигналов виброакустической эмиссии равной длины. Синхронизация данных осуществлялась по показаниям датчика угловой скорости таким образом, чтобы синхронизированные отрезки сигналов могли считаться полученными при одном и том же положении коленчатого вала. Преобразовав виброакустические сигналы в векторы спектральной характеристики и сопоставив их с учетом геометрического положения на поверхности ДВС точек, в которых они были измерены, получим поверхность – ВАК, характеризующую интенсивность виброакустических процессов, протекающих в той или иной части ДВС.

Для записи сигналов была разработана программа Writer-v306, позволяющая выполнять необходимое количество циклов записи рациональной длины в рамках одного измерения (рис. 3).

Число циклов записи определяется количеством точек в схеме разбивки исследуемой поверхности, длина каждого цикла принимается такой, чтобы объем каждого из записанных файлов не превысил объем оперативной памяти компьютера. Программа обеспечивает автоматическую нумерацию файлов в соответствии с порядковым номером точки измерения. Также предусмотрена возможность двух-, четырех- и восьмикратного усиления сигналов в любом из двух каналов.

**Анализ полученных данных.** Анализ полученных данных выполнялся в два этапа:

– выделение в сигналах фрагментов, соответствующих четырем оборотам коленчатого вала, и



Рис. 2. Общий вид измерительной аппаратуры (обозначения см. в тексте)

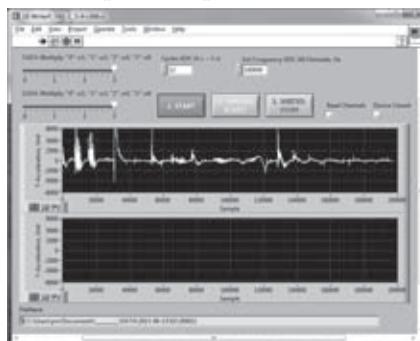


Рис. 3. Интерфейс программы Writer-v306



построение для них амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);

– объединение АЧХ узловых точек в единую поверхность – ВАК.

АЧХ для зафиксированного сигнала  $f$  длины  $N$  рассчитывали в соответствии с зависимостями дискретного Фурье-преобразования [6, 8]. При этом в комплексной форме коэффициенты гармонического ряда определялись как

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i e^{-j(2\pi/N)ki}, \quad (1)$$

где  $k = 1, 2, \dots, \left(\frac{N}{2}\right)$ ;  $\text{Re}(C_0) = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^{N-1} f_i$ ;  $\text{Im}(C_0) = 0$ .

Коэффициенты гармонического ряда рассчитывали в соответствии с алгоритмом быстрого Фурье-преобразования FFT, для этого размерность фрагмента вектора сигнала  $f$  принимали равной  $N = 2^n$ .

Построение АЧХ сигналов виброакустической эмиссии выполнялось на основе фундаментальных свойств:

для амплитуды

$$A_k = |C_k| = \sqrt{\text{Re}(C_k)^2 + \text{Im}(C_k)^2}, \quad (2)$$

для частоты

$$v_k = \frac{1}{Tk}, \quad (3)$$

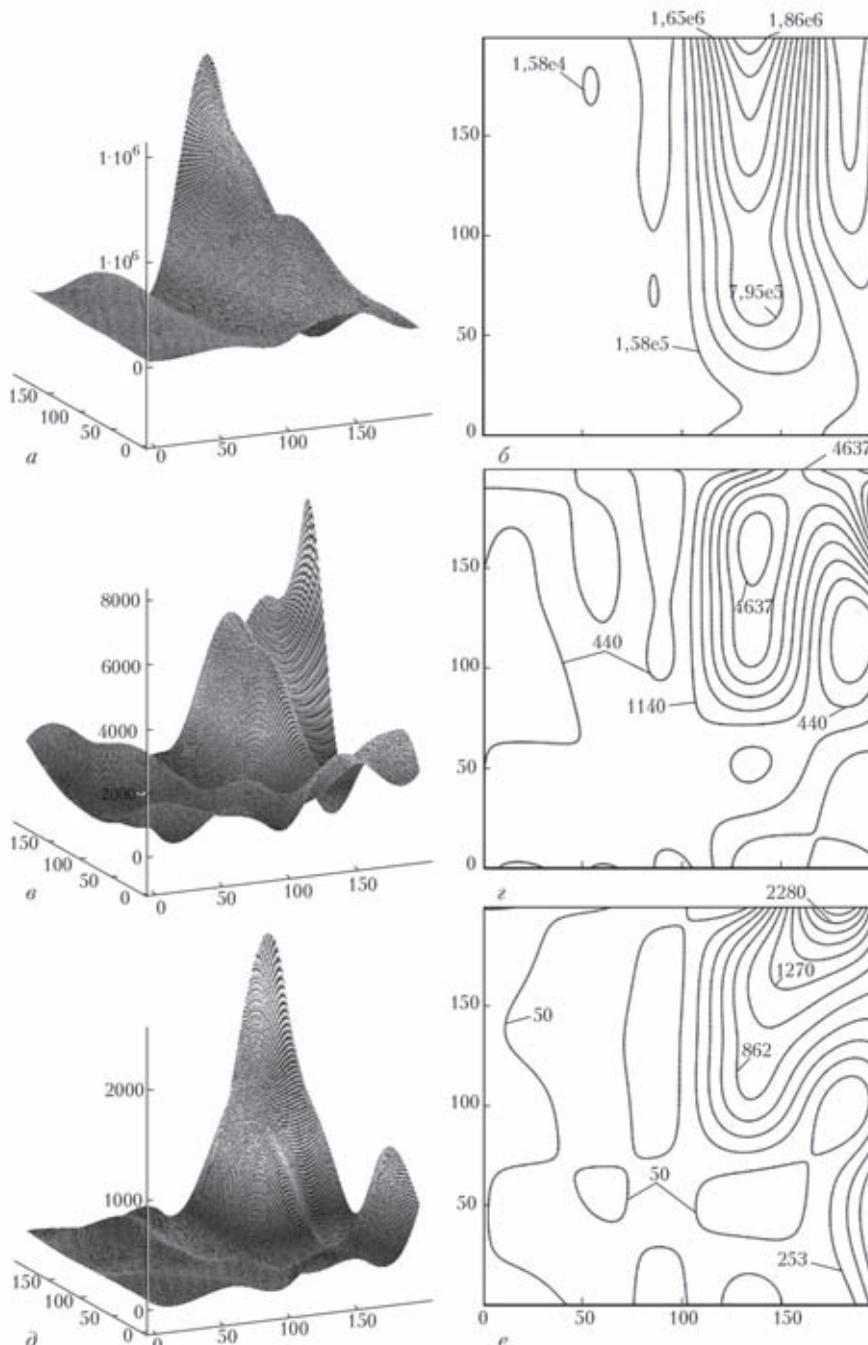


Рис. 4. ВАК поверхности корпуса ДВС для различных частотных диапазонов, Гц



где  $T$  – период опроса канала аналого-цифрового преобразователя, с.

Объединение АЧХ узловых точек в ВАК выполнялось следующим образом

Формировалась матрица  $M$  векторов АЧХ в узловых точках размерностью  $7 \times 7$ :

$$M_{j,k} = A_{n+k}, \quad (4)$$

где  $A_i$  – вектор АЧХ  $i$ -го узла виброакустической карты;  $n$  – порядковый номер строки матрицы  $M$ .

Был установлен частотный диапазон визуализации энергии:  $fb$  – нижняя граница,  $ft$  – верхняя граница. В матрице  $M$  выделялась суммарная виброакустическая энергия в заданном частотном диапазоне:

$$fb = FB \frac{SR}{N}, \quad (5)$$

$$ft = FT \frac{SR}{N}, \quad (6)$$

где  $FB, FT$  – соответственно номер нижней и верхней гармоники;  $SR$  – частота опроса одного канала (50000 Гц);  $N$  – размерность вектора АЧХ.

В соответствии с принятым шагом  $L = 0,07$  м формировалась матрица  $MM$  узловых точек ВАК:

$$MM_{j,k} = \sum_{FB}^{FT} (M_{j,k})_{FB}. \quad (7)$$

Выполнялась интерполяция матрицы  $MM$  кубическим сплайном, для этого определялись значения интерполирующего коэффициента  $S$ :

$$S = \text{cspline}(X, Y), \quad (8)$$

где  $X$  – сетка координат;  $Y$  – значения векторов.

Тогда ВАК представляет собой результат интерполяции:

$$VAM = \text{interp}(S, X, MM, V), \quad (9)$$

где  $V$  – вектор поверхности.

Данная методика позволяет оценивать интенсивность виброакустической эмиссии в любом заданном диапазоне частот. Так, на рисунках представлены виброакустические карты в виде поверхностей и изолиний для следующих диапазонов: 6...50000 Гц (рис. 4, а), 500...50000 Гц (рис. 4, б), 2000...50000 Гц (рис. 4, в). Как видно

из диаграмм, основная энергия колебаний сосредоточена в низкочастотной области, что обусловлено вертикальными колебаниями корпуса ДВС относительно подвески. При повышении нижней границы диапазона анализируемых частот на ВАК проявляется область концентрации энергии в высокочастотной составляющей, геометрически расположенная в районе газораспределительного механизма первого цилиндра.

Точные координаты максимумов концентрации энергии могут быть определены привязкой ВАК к топологии корпуса двигателя, что может быть использовано для локализации дефектов механизмов и систем во время технической диагностики.

### Выводы

Метод ВАК позволяет определять координаты геометрического положения на поверхности корпуса двигателя областей с максимальными виброакустическими колебаниями в заданных частотных диапазонах.

Метод ВАК рекомендуется для практического использования при диагностировании двигателей внутреннего сгорания и других сложных технических систем.

1. Оксень Е. И., Цокур В. Г., Оксень Д. Е. Исследование особенностей сигналов акустической эмиссии, возникающих в кинематических парах двигателя при работе со знакопеременными нагрузками // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 1. – С. 141–146.
2. Оксень Е. И., Цокур В. Г., Оксень Д. Е. Методика оценки ресурса кинематических пар механизмов двигателя по уровню сигналов акустической эмиссии // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий зб. – 2007. – № 1(4). – С. 138–142.
3. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 387 с.
4. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 755 с.
5. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. – С.-Пб.: Питер, 2002. – 608 с.
6. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике // Под ред. К. Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 260 с.
7. Филоненко С. Ф. Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. – Киев: КНУЦА, 1999. – 304 с.
8. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов: Учеб. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. – 344 с.

The paper deals with the issues of improving the effectiveness of diagnosing the systems of fastening the case and mechanisms of internal combustion engines by determination of the vibroacoustic field response on outer surfaces of case parts for bench testing. Experimental investigations were performed of the influence of defects in suspension and mechanisms of internal combustion engines on vibroacoustic energy distribution over the case part outer surfaces. Investigation procedure consists in recording the vibrations of case part surfaces as a response of the totality of all the vibrational processes running in the engines in stationary operating modes and plotting the so-called vibroacoustic map. Accurate coordinates of energy concentration maximums can be determined by matching the vibroacoustic map to engine case topology that can be used to localize the defects of mechanisms and systems during engineering diagnostics. Method of vibroacoustic maps is recommended for practical application at diagnosis of internal combustion engines and other complex engineering systems. References 8, Figures 4.

Key words: internal combustion engine, defect, diagnostics, vibroacoustic emission, vibroacoustic field, vibroacoustic map

Поступила в редакцию  
02.08.2013

# АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СЕКЦИЙ ШАХТНЫХ КРЕПЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В. А. КУЛИШ<sup>1</sup>, Э. С. КРЫЛОВ<sup>1</sup>, А. В. ДРОЗДОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГП «Институт «УкрНИИпроект». 03680, г. Киев, пр-т. Акад. Палладина, 46/2.

E-mail: post@unp.kiev.ua

<sup>2</sup>Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.

E-mail: adroz@ukr.net

Цель работы – разработка средства и методики акустико-эмиссионного (АЭ) контроля несущих металлоконструкций (МК) шахтных механизированных крепей на предмет выявления опасных дефектов, которые развиваются под нагрузкой в основном металле и сварных соединениях. Метод исследования – экспериментально-расчетный. Разработан и изготовлен четырехканальный аппаратно-программный комплекс «КОМПАС», основанный на методе АЭ в ультразвуковом диапазоне частот и тензометрическом методе измерения напряженно-деформированного состояния несущих МК в процессе АЭ контроля. Область применения комплекса «КОМПАС» – диагностика технического состояния несущих МК крепей (новых и после эксплуатации) в процессе их прочностных стендовых испытаний перед опусканием в забой. Основные функции комплекса «КОМПАС» – измерение акустических сигналов по четырем независимым каналам в процессе контроля объекта и сохранение результатов в виде отдельных файлов; регистрация в реальном времени четыре основных информативных параметров сигналов АЭ; измерение скорости распространения акустических волн; определения координат источников АЭ на поверхности (плоскости) элементов и узлов крепей; классификация источников АЭ по степени опасности; регистрация в реальном времени деформации элементов МК крепи одновременно с сигналами АЭ; подавление электромагнитных и механических помех. Библиогр. 12, рис. 9.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, диагностика, шахтная крепь, прочность, испытание, комплекс «КОМПАС», контроль, стенд

Шахтные механизированные крепи являются одними из наиболее ответственных узлов горно-шахтного оборудования, обеспечить надежность и безопасность которого невозможно без современных методов и средств испытания их в процессе изготовления и проведения восстановительных работ.

Заданная при проектировании прочность несущих металлоконструкций (МК) крепей должна подтверждаться результатами стендовых испытаний, позволяющих выявлять дефекты в сварных соединениях и основном металле, которые в условиях подземной эксплуатации могут развиваться и приводить к серьезным авариям [1–3].

Для проведения комплексных испытаний секций шахтных механизированных крепей в сборе в последние годы успешно используется новый современный стенд СТД-2000, разработанный и изготовленный в Украине [2–6].

Сочетание функциональных и силовых характеристик этого стенда обеспечивает активное вертикальное и горизонтальное нагружение секций крепей высотой 0,6...6,0 м максимальным вертикальным усилием  $2 \cdot 10^4$  кН, поэтому на этом стенде могут быть испытаны практически все типы современных крепей, которые используются на шахтах Украины.

Стенд СТД-2000 обеспечивает возможность проведения испытаний секций в максимально широком диапазоне схем и параметров нагружения с регистрацией всех показателей, необходимых для определения характеристик прочности крепей, которые определяют их эксплуатационную надежность и ресурс.

В соответствии с действующими государственными и отраслевыми нормативно-техническими документами, основными методами контроля прочности крепей являются измерение пространственной остаточной деформации несущих МК, а также визуальный и инструментальный контроль наружных сварных швов на отсутствие трещин.

Указанные методы не обеспечивают эффективный контроль МК на наличие внутренних дефектов, особенно в закрытых сечениях узлов МК крепей, недоступных для визуального контроля.

Кроме того, допуски по выявленным с помощью традиционных методов неразрушающего контроля (ультразвукового, радиографического и др.) дефектам сварных соединений зависят от категории швов, которые обычно классифицированы по видам нагружения. В большинстве случаев из-за сложной схемы нагружения конструкции не представляется возможным однозначно отнести сварное соединение к той или иной категории, а значит, объективно оценить результаты дефектоскопии.



Учитывая специфические преимущества акустико-эмиссионного (АЭ) метода контроля, позволяющего выявлять развивающиеся дефекты под нагрузкой, а также технические характеристики стенда СТД-2000, в ГП «Институт «УкрНИИпроект» был разработан и изготовлен комплекс АЭ контроля несущих МК секций шахтных механизированных крепей «КОМПАС» (рис. 1), который позволяет проводить контроль МК в процессе штатных прочностных испытаний крепей на стенде СТД-2000 статическими и динамическими нагрузками.

Комплекс «КОМПАС» предназначен для выявления в несущих МК крепей (новых и после эксплуатации) опасных дефектов в основном металле и сварных соединениях, которые развиваются в процессе испытаний [7, 8]. Работа комплекса основана на использовании метода АЭ в ультразвуковом диапазоне частот, а также тензометрического метода измерения напряженно-деформированного состояния несущих металлоконструкций в процессе АЭ контроля.

Комплекс «КОМПАС» состоит из четырех пьезопреобразователей сигналов АЭ с предварительными усилителями, четырех тензопреобразователей деформаций с резисторными мостами, двух имитаторов АЭ (импульсного и управляемого), а

также блока обработки сигналов АЭ и тензометрической станции, которые расположены в одном корпусе.

Комплекс «КОМПАС» выполняет следующие основные функции:

- измеряет акустические сигналы по четырем независимым каналам в процессе контроля объекта и сохраняет результаты в виде отдельных файлов;
- регистрирует в реальном времени основные информативные параметры сигналов АЭ: суммарный счет АЭ, активность АЭ, амплитуду сигналов АЭ и разность времени прихода сигналов АЭ к преобразователям;
- измеряет скорость распространения акустических волн по разности времени прихода импульсов от имитатора сигналов АЭ к двум разнесенным датчикам;
- определяет координаты источников АЭ на поверхности (плоскости) элементов и узлов крепей по разности времен прихода импульсов АЭ к четырем разнесенным датчикам;
- классифицирует источники АЭ по степени опасности (пассивный, активный, критически активный и катастрофически активный);
- регистрирует в реальном времени деформации (напряжения) элементов МК с помощью тензодатчиков, расположенных в четырех разнесенных на плоскости МК крепи, одновременно с сигналами АЭ (с целью исключения ошибочных сигналов АЭ и оценки степени опасности источника АЭ);
- регистрирует сигналы по двум служебным каналам;
- подавляет электромагнитные и механические помехи.

Комплекс «КОМПАС» (рис. 2) состоит из пьезоэлектрических преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), которые работают в ультразву-



Рис. 1. Общий вид комплекса «КОМПАС»

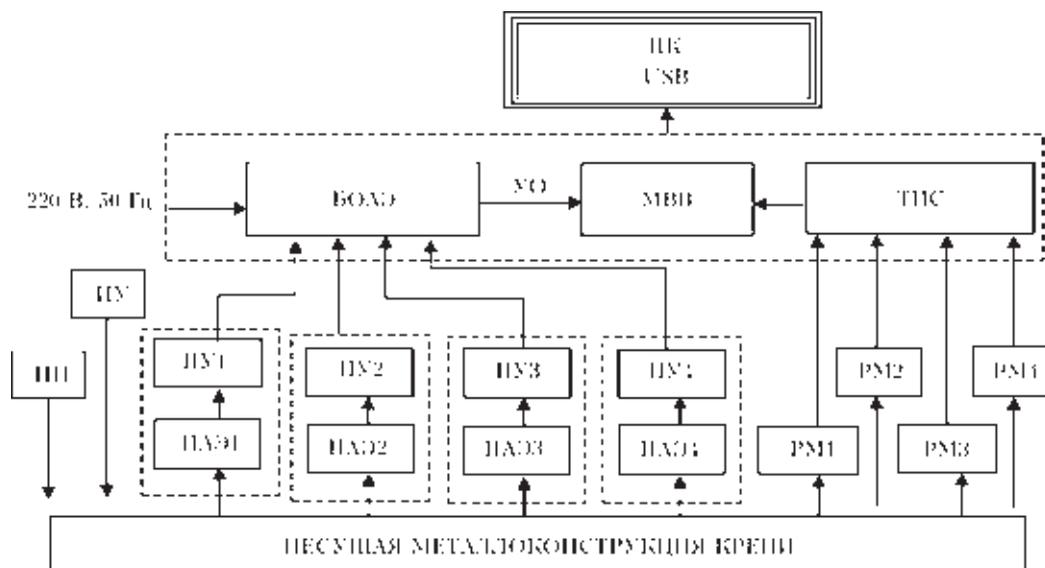


Рис. 2. Структурная схема комплекса «КОМПАС» (описание см. в тексте)

ковом диапазоне частот; предварительных усилителей (ПУ) для усиления и передачи сигналов АЭ; тензопреобразователей деформаций и резисторных мостов (РМ); устройства обработки (УО) сигналов АЭ и деформаций; импульсного (ИИ) и управляемого (ИУ) имитаторов сигналов АЭ, которые позволяют оперативно проводить проверку работоспособности и калибровку измерительных каналов, определять скорость распространения ультразвуковых колебаний (УЗК) в металлоконструкции, проверять точность определения координат дефектов; компьютера персонального (ПК) переносного типа Notebook, который накапливает, обрабатывает и анализирует информативные параметры АЭ и деформации.

**Техническая характеристика комплекса «КОМПАС»**

Количество независимых измерительно-преобразовательных каналов .....	4
Количество измерительных каналов деформаций .....	4
Регистрация информативных параметров АЭ: суммарный счет; активность; амплитуда; разность времени прихода сигналов АЭ к преобразователям	
Рабочий диапазон преобразователей, кГц .....	20...200
Коэффициент усиления предварительного усилителя, не менее, дБ .....	40
Среднеквадратическое значение напряжения собственных шумов измерительного канала АЭ, приведенное к его входу, мкВ, не более .....	5
Диапазон измерения активности АЭ, имп/с .....	0...1·10 <sup>5</sup>
Динамический диапазон измерения амплитуды АЭ, не менее, дБ .....	60
Диапазон измерения времени прихода импульсов АЭ, мс .....	0...100
Диапазон измерения упругих деформаций, м/м .....	0...1·10 <sup>-3</sup>
Граница допускаемой относительной ошибки суммарного счета АЭ, % .....	± 5,0
Граница допускаемой относительной ошибки измерения скорости счета АЭ, % .....	± 5,0
Граница допускаемой абсолютной ошибки измерения разницы времени прихода импульсов АЭ, мкс .....	50
Доверительный интервал измерений, % .....	± 96,0
Габариты и масса составных частей комплекса «КОМПАС», мм; кг:	
преобразователь сигналов АЭ	
с предусилителем .....	Ø105x85; 0,55
имитатор управляемый .....	Ø105x85; 0,55
имитатор импульсный .....	111x70x35; 0,1
устройство обработки .....	308x305x160; 8,7
персональный компьютер .....	370x256x35; 2,6

В состав УО входят: четырехканальный блок обработки сигналов АЭ (БОАЭ); четырехканальная тензоизмерительная станция ТИС; модуль ввода/вывода МВВ аналоговых сигналов амплитуды АЭ и деформаций, а также цифровых сигналов (импульсов АЭ) к персональному компьютеру.

Четыре преобразователя АЭ (ПАЭ1–ПАЭ4), совмещенные с предварительными усилителями ПУ1–ПУ4, устанавливаются на объекте контроля (рис. 3).

Резисторные мосты РМ1–РМ4 с тензопреобразователями деформаций расположены в местах

контроля объекта и с помощью соединительных кабелей подключены к входам четырехканальной тензоизмерительной станции ТИС, которая обеспечивает их питание, усиление полезных сигналов и балансировку нуля. Аналоговые сигналы амплитуды АЭ, деформаций, а также цифровые нормированные импульсы АЭ поступают на соответствующие входы модуля ввода/вывода МВВ, где поддаются оцифровке и вводу в персональный компьютер по последовательному интерфейсу USB.

Программное обеспечение комплекса «КОМПАС» осуществляет:

- определение информативных параметров АЭ;
- расчет разности времени прихода (РВП) импульсов АЭ к ПАЭ и скорости распространения УЗК;
- определение координат источников АЭ на поверхности (плоскости) элементов крепи;
- комплексную обработку полученных экспериментальных данных.

Проведение контроля несущих МК секций крепи в сборе на стенде СТД-2000 с помощью комплекса «КОМПАС» (рис. 4) включает следующие процедуры:

- определение скорости ультразвуковых колебаний (УЗК);
- определение коэффициента преобразования деформаций;
- контроль несущих МК в процессе нагружения.

Определение скорости УЗК проводится с использованием импульсного имитатора для каждого конструктивного элемента крепи (перекрытие, консоль, ограждение и основа) отдельно.

Программное обеспечение комплекса в режиме «РВП. Скорость УЗК» позволяет расчетным путем получить значение скорости УЗК, которое впоследствии используется для определения координат источников АЭ.

Определение коэффициента преобразования деформаций проводится с помощью выносных резисторных мостов, которые подключаются к каналам измерения деформаций тензорезисторной станции и после соответствующих измерений проводится расчет.

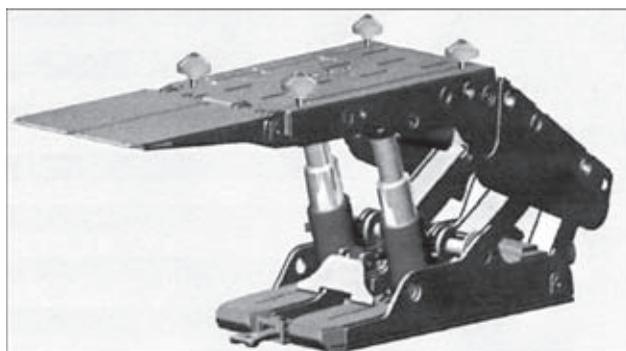


Рис. 3. Секция шахтной крепи с установленными на ее перекрытии датчиками АЭ и тензорезисторами

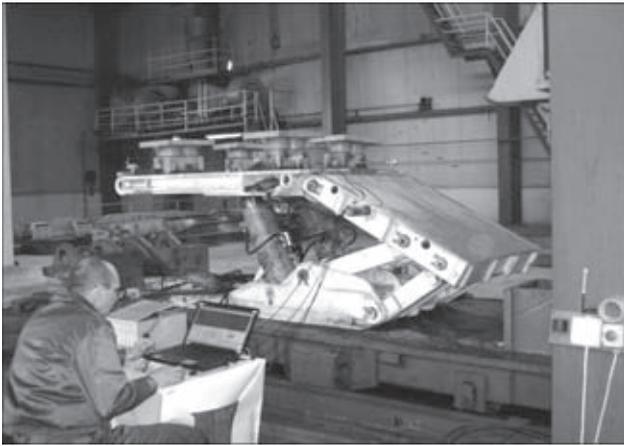


Рис. 4. Прочностные испытания секции шахтной крепи с использованием комплекса «КОМПАС»

Методика контроля несущих МК в процессе нагружения предусматривает совмещение штатных испытаний секций крепей на прочность на стенде СТД-2000 [2] с АЭ контролем их с помощью комплекса «КОМПАС».

Поэтому режимы нагружения секции в сборе и ее отдельных конструктивных элементов при проведении контроля соответствуют разработанным для этой цели схемам статического нагружения (рис. 5–7).

Режим АЭ контроля предусматривает проведение его в процессе статического нагружения секции по ступенчатой схеме [9,10]:

- первая ступень нагружения –  $0,5P_{\text{НОМ}} = 1400$  кН;
- вторая ступень нагружения –  $P_{\text{НОМ}}^* = 2800$  кН;

– третья ступень нагружения –  $1,2P_{\text{НОМ}} (P_{\text{ИСП}}^{**} = 3360$  кН), где  $P_{\text{НОМ}}^*$  – сопротивление секции максимальной рабочей мощности пласта;  $P_{\text{ИСП}}^{**}$  – испытательное нагружение.

С помощью программы «КОМПАС» осуществляется автоматическая обработка экспериментальных данных для определения опасности источников АЭ и их координат. На изображение конструктивного элемента крепи выводятся в виде цветных точек источники АЭ с определенными координатами (рис.8).

Программа «КОМПАС» предусматривает также выведение результатов оценки опасности всех источников АЭ в графическом изображении в виде диаграммы «степень опасности зарегистрированных источников АЭ – время испытания (или нагружение)» (рис. 9).

Анализ может проводиться для всего процесса испытания или только на отдельном участке выдержки нагружения.

В случае фиксации в процессе контроля МК активных, критически и катастрофически активных источников АЭ необходимо определить их координаты, а потом в этих местах провести дополнительный контроль традиционными методами НК (ультразвуковым, радиографическим и др.).

Эффект от внедрения комплекса «КОМПАС» при прочностных испытаниях секций шахтных механизированных крепей достигается за счет:

- обеспечения безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования;

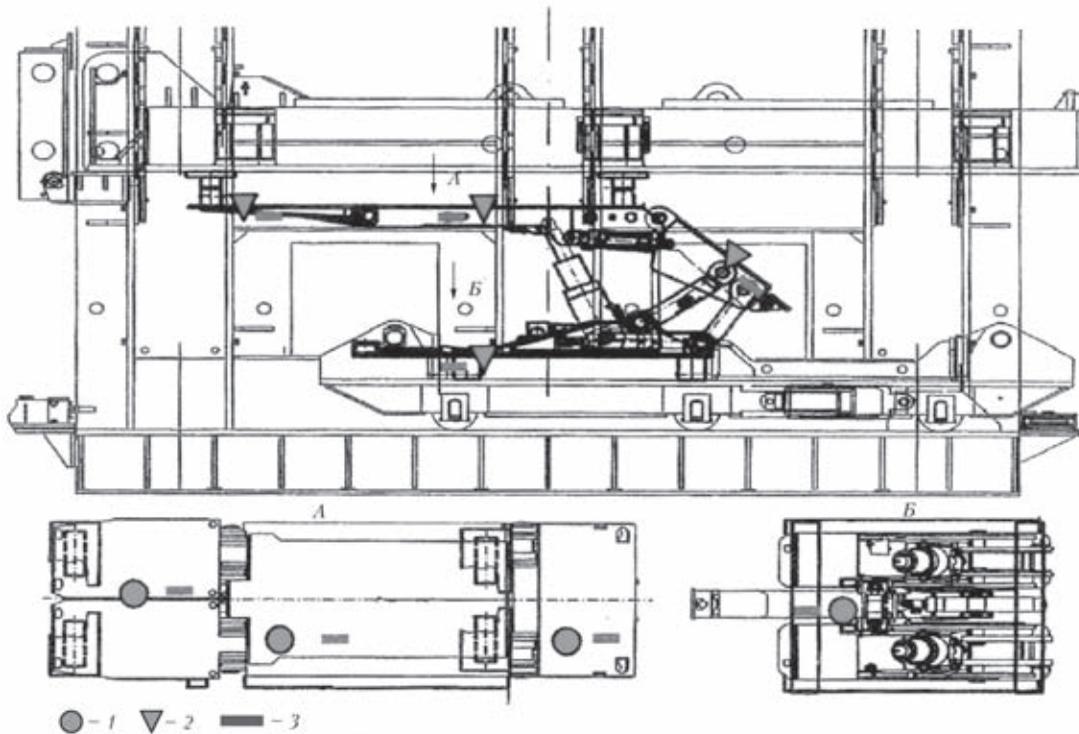


Рис. 5. Схема размещения датчиков АЭ и тензодатчиков при симметричном нагружении секции крепи: 1, 2 – датчики АЭ; 3 – тензорезисторные датчики

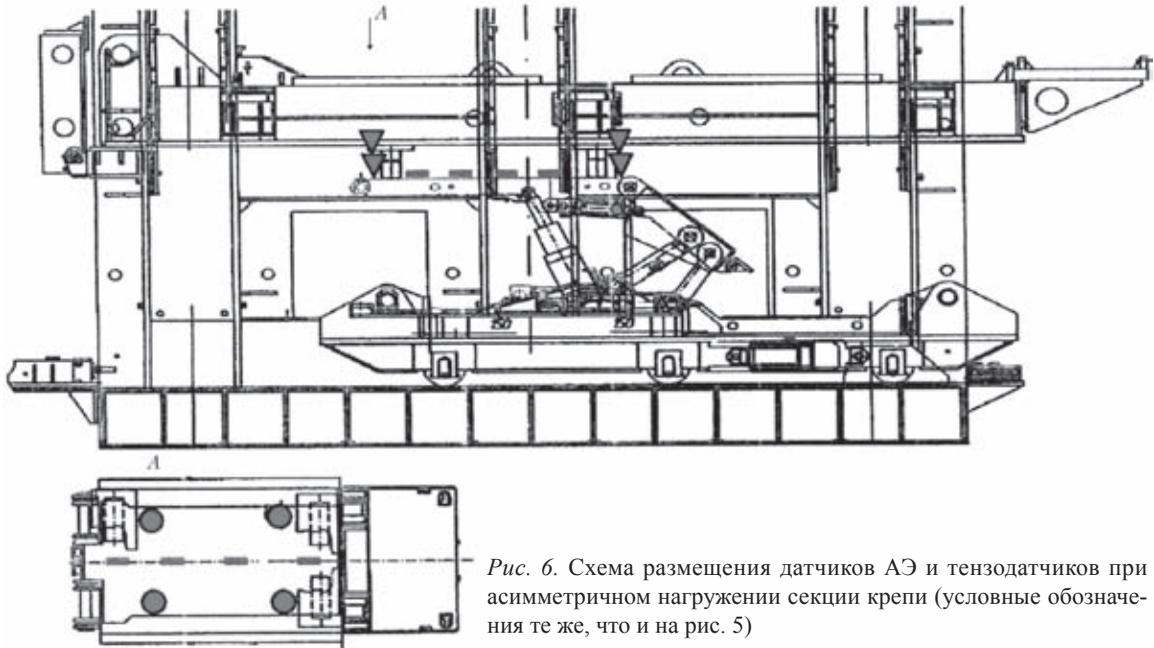


Рис. 6. Схема размещения датчиков АЭ и тензодатчиков при асимметричном нагружении секции крепи (условные обозначения те же, что и на рис. 5)

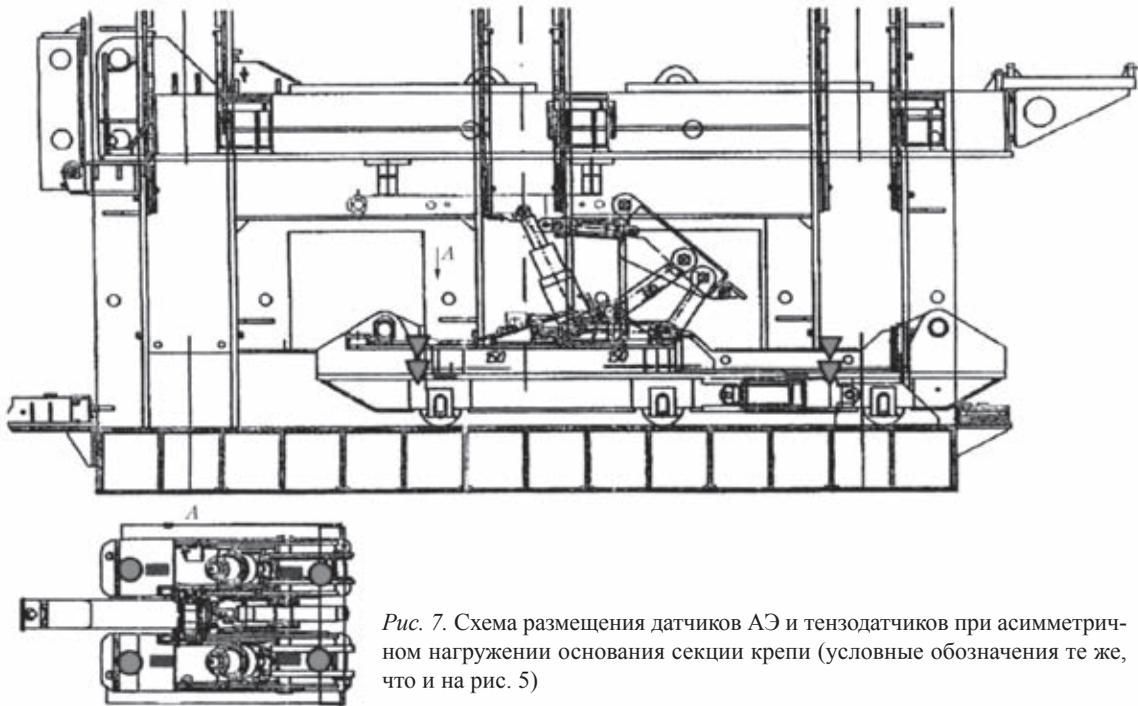


Рис. 7. Схема размещения датчиков АЭ и тензодатчиков при асимметричном нагружении основания секции крепи (условные обозначения те же, что и на рис. 5)

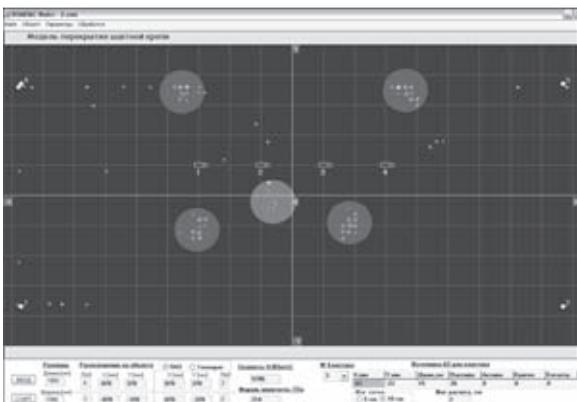


Рис. 8. Перекрытие шахтной крепи с зонами дефектов

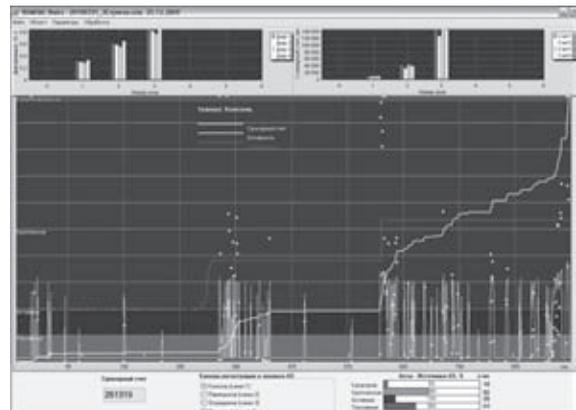


Рис. 9. Анализ сигналов АЭ и деформации несущих МК



– сокращения простоев оборудования из-за поломок (аварий) МК в результате обнаружения опасных дефектов на ранней стадии их развития;  
 – сокращения трудоемкости обследования МК по сравнению с традиционными методами НК;  
 – документирования результатов АЭ контроля и оценки технического состояния механизированных шахтных крепей с помощью современных компьютерных технологий.

Комплекс «КОМПАС» успешно прошел приемочные испытания на стенде СТД-2000 и Государственную метрологическую аттестацию в Укрметртестстандарт (Свидетельство о Государственной метрологической аттестации № 22-1364 от 30 июля 2010 г.).

### Выводы

Разработаны аппаратно-программный комплекс «КОМПАС» и методика диагностики несущих МК шахтных механизированных крепей в процессе их прочностных испытаний.

Комплекс «КОМПАС» использует метод АЭ в ультразвуковом диапазоне частот, а также тензометрический метод измерения напряженно-деформированного состояния несущих МК в процессе АЭ контроля.

Комплекс «КОМПАС» успешно прошел приемочные испытания на стенде СТД-2000 и Государственную метрологическую аттестацию.

1. *Постанова* Кабінету Міністрів України від 26.05.04 р. № 687 «Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки».
2. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 812 с.
3. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Акустическая эмиссия и ресурс конструкций (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 2. – С. 5–19
4. *Испытательный стенд СТД-2000 для механизированных крепей* / В. В. Косарев, И. Г. Вассерман, А. В. Медников и др. // Уголь. – 2006. – № 5.
5. *Система управления стендом СТД-2000 для испытаний секций механизированной крепи* / Ю. Н. Кирилюк, Н. А. Полубедов, Н. И. Стадник // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 6.
6. *Испытательный стенд СТД-2000 для механизированных крепей в России* / В. В. Косарев, Г. Вассерман, М. Б. Лидерман и др. // Уголь. – 2006. – № 8.
7. *Комплекс акустико-эмиссионного контроля «КОМПАС»* / В. В. Радченко, В. А. Кулиш, Э. С. Крылов и др. // Там же. – 2011. – № 1.
8. *Акустико-эмиссионный метод контроля шахтной крепи* / В. В. Радченко, В. А. Кулиш, Э. С. Крылов, А. В. Дроздов // Матер. 1-й Международной промышленной конф. «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях». – Пос. Плавье (Украина), 10–14 фев. 2011. – С. 96-99
9. *COU 10.1.00174125.006:2005.* Правила проведения контролю несущих металлоконструкцій об'єктів технологічних комплексів гірничих підприємств акустико-емісійним методом.
10. *COU 10.1.00174125.015:2008.* Несучі металеві конструкції гірничого устаткування і гірничотехнічних споруд. Оцінка технічного стану.

The aim of work is a development of mean and procedure of acoustic-emission testing (AE) of metal load-carrying structures (MS) of powered supports for the purpose of detection of dangerous defects which are developed under loading in base metal and welded joints. An experimental-calculation method of investigation is used. A four-channel hardware and software complex «Kompas», based on AE method in ultrasonic frequency range and strain-gauge method of measurement of stressed-strain state of load-carrying MS in process of AE testing, was developed. Area of application of the «Kompas» complex is a diagnostics of technical state of load-carrying MS supports (new and after operation) in process of their strength bench tests before running in a working face. The main functions of the «Kompas» are measurement of acoustic signals on four independent channels in a process of object examination and saving of the results in a form of separate files; registration of four main informative parameters of AE signals in real time; measurement of velocity of acoustic wave propagation; determination of coordinates of AE sources on a surface (plane) of the elements and support assemblies; classification of AE sources on level of danger; registration of deformation of the MS support elements simultaneously with AE signals in real time; suppression of the electromagnetic and mechanical interferences. References 12, Figures 9.

*Keywords:* acoustic emission, diagnostics, ground support, strength; testing; complex; control, bench

Поступила в редакцию  
05.06.2013

### НОВА КНИГА

**Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання** / В. М. Учанін. – Львів: СПОЛОМ, 2013. – 268 с.

Монографія присвячена розробці вихрострумових перетворювачів (ВСП) подвійного диференціювання. Як утворювальний елемент для їх побудови розглянуто особливості анаксіальних ВСП. Проаналізовано конструкції і механізми формування сигналів від дефектів у ВСП подвійного диференціювання. Подано результати досліджень, які засвідчують їх можливість для розв'язання найскладніших задач неруйнівного контролю.

Для наукових співробітників і інженерів, що займаються дослідженням і розробкою методів і засобів неруйнівного контролю, а також аспірантів і студентів вузів зі спеціальностей «Методи неруйнівного контролю» і «Діагностика матеріалів і конструкцій». Іл. 201. Табл. 16. Бібліогр. 307 назв.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТИЗОВ С ПОМОЩЬЮ КОЭРЦИТИМЕТРА «СИЛА»

А. Б. МАКСИМОВ

Гос. морской технологический ун-т. г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82. E-mail: kmte@aironet.com.ua

Исследована возможность поштучного контроля метизов неразрушающим методом в производственных условиях. Применен магнитный феррозондовый метод с измерением величины коэрцитивной силы стали с помощью структурного импульсного локального анализатора (СИЛА). Исследуемые объекты – болты М20х1,5 из стали 35 и 40Х, шайбы пружинные из стали 65Г. Изделия подвергались закалке в масле с последующим отпуском. Предложены уравнения регрессии, связывающие твердость изделий (HRCэ) со значением коэрцитивной силы. Коэффициент корреляции составил не менее 0,8. Определены интервалы значений коэрцитивной силы, в которых твердость стали удовлетворяет требованиям стандарта. Показано, что для уменьшения отбраковки изделий по твердости необходимо учитывать значения углеродного эквивалента. Установлена взаимосвязь между углеродным эквивалентом и твердостью. Предложено дифференцировать температуру отпуска в зависимости от углеродного эквивалента стали. Разработана принципиальная схема управления качеством при производстве метизов, включающая НК изделий до термической обработки, учет уровня углеродного эквивалента стали и выходной НК. Библиогр. 3, табл. 2, рис. 3.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, феррозондовый датчик, метизы, твердость стали, уравнение корреляции, термическая обработка, сдаточный контроль

Определение механических свойств стальных деталей с достаточно высоким уровнем надежности осуществляется феррозондовым неразрушающим методом [1, 2].

Крепежные детали являются важными элементами конструкций и в значительной мере определяют их жесткость и прочность. Вследствие этого в особо важных конструкциях и механизмах, например, для стальных металлических болшепролетных ферм, башмаков гусеничной транспортной техники и др. для снижения уровня возможности разрушения необходимо контролировать каждую крепежную деталь.

В настоящее время на метизных заводах контроль крепежных изделий проводится выборочно. Сдаточной характеристикой метизов является уровень твердости. Применение методов определения твердости по Бринеллю или Роквеллу принципиально невозможно для каждой детали, так как ввиду сложной формы изделия (болт, гайка, шайба) вначале необходимо изготовить из него шлиф, а затем измерить твердость.

Для осуществления 100%-го контроля качества метизов необходимо применять неразрушающие методы. Учитывая, что метизы имеют сравнительно небольшие размеры, а производство их массовое и поточное, из неразрушающих методов контроля наиболее приемлемыми являются токовихревой и магнитный.

Цель настоящей работы — определение возможности разбраковки метизов по группам твердости в зависимости от уровня коэрцитивной силы.

В качестве материала исследования использовали метизы производства ОАО «Дружковский метизный завод». При исследовании применили феррозондовый метод, реализуемый структурным импульсным локальным анализатором (СИЛА). Накладной феррозондовый датчик имеет рабочую поверхность размером 10×10 мм, информационный параметр – коэрцитивная сила.

Математическую обработку полученных результатов проводили с использованием программы Excel на ПК.

**Исследование болтов (М20х1,5) и гаек (М20х1,5) по ГОСТ 15526–70 из стали 35.** Болты из стали 35 термически обрабатываются на твердость: НВ 241...354 – первая группа и НВ 225...300 – вторая группа. На «сырых» (не обработанных термически) и термически обработанных болтах измеряли твердость по Бринеллю и коэрцитивную силу на цилиндрической части. На рис. 1, а представлена зависимость между коэрцитивной силой и твердостью.

Аналитически эта зависимость имеет вид:

$$(HB) = 4 \cdot 10^{-4} (H_c)^2 - 0,43 H_c + 295,33, \quad (1)$$

где НВ – твердость по Бринеллю;  $H_c$  – величина коэрцитивной силы; коэффициент корреляции 0,98.

Гайки из стали 35 проходят аналогичную термическую обработку до получения твердости по стандарту НВ 241...341.

На рис. 1, б представлена зависимость между коэрцитивной силой и твердостью для стали гаек.

Корреляционное уравнение имеет вид:

$$(HB) = -3 \cdot 10^{-4} (H_c)^2 + 0,85 H_c - 222,71. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции 0,98.

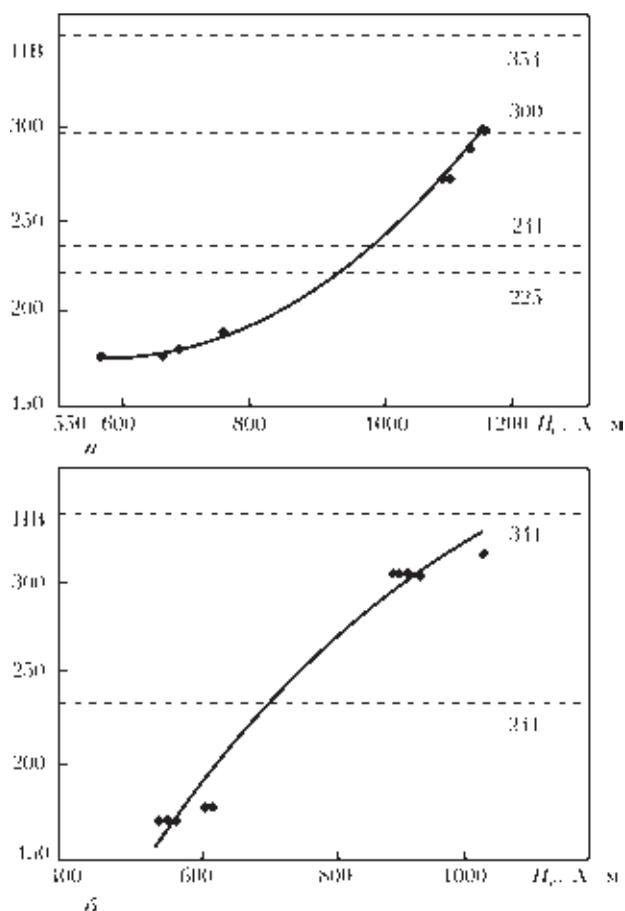


Рис. 1. Зависимость НВ от коэрцитивной силы  $H_c$  для болтов (а) и гаек (б) из стали 35 (числа на графике – нижний и верхний пределы твердости по стандарту)

На график нанесены уровни твердости по группам. Видно, что с помощью измерения коэрцитивной силы возможно отбраковывать болты и гайки из стали 35 на нижних и верхних пределах. Так, для болтов первой группы, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 15526–70, интервал по значениям коэрцитивной силы составляет (1000...1200) А/м, а для второй группы (950...1150) А/м. Коэрцитивная сила стали гаек, удовлетворяющих требованиям стандарта, имеет интервал (750...1100) А/м.

**Исследование болтов (M20×1,5) из стали 45Х (ГОСТ 22353–77) с шестигранной или круглой головкой.** Болты из стали 40Х термически обрабатывают на различную твердость по группам: первая – высокопрочные с твердостью НВ 302...388, вторая – с твердостью НВ 286...364), третья – болты башмака гусеницы трактора с твердостью НВ 269...363. Твердость измеряется на цилиндрической части болта.

До термической обработки («сырое» состояние) болты имеют твердость в интервале НВ 165...190, а значения коэрцитивной силы в интервале 750...900 А/м. Термическая обработка включает закалку в масле с последующим отпуском. На рис. 2 представлена зависимость твердости от коэрцитивной силы на цилиндрической

части болтов после термической обработки и в «сыром» состоянии.

Корреляционное уравнение имеет вид

$$(НВ) = -2 \cdot 10^{-4}(H_c)^2 + 0,59H_c - 168. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции 0,8.

Для всех трех групп твердости возможно разделение по нижним пределам стандарта. В связи с тем, что в данной партии болтов максимальное значение твердости не превышало НВ 340...345, не удалось установить разделение групп по верхнему пределу.

Для первой группы твердости нижний предел, значения коэрцитивной силы составляет 1150, для второй – 1250, для третьей – 1350 А/м.

**Исследование шайб пружинных из стали 65Г.** Шайбы пружинные из стали 65Г подвергаются закалке (температура нагрева под закалку 860 °С) в масле с последующим отпуском при температуре 400 °С на твердость HRC<sub>3</sub> 41...51.

Результаты экспериментов обобщены в табл. 1.

**Анализ полученных данных.** В основном готовые изделия имеют определенный интервал соответствующих значений механических свойств в соответствии со стандартами. При соблюдении значений параметров технологических режимов большинство изделий удовлетворяет требованиям стандарта, однако часть образцов имеет более высокий уровень твердости, а часть – меньший уровень твердости, чем предусмотренные стан-

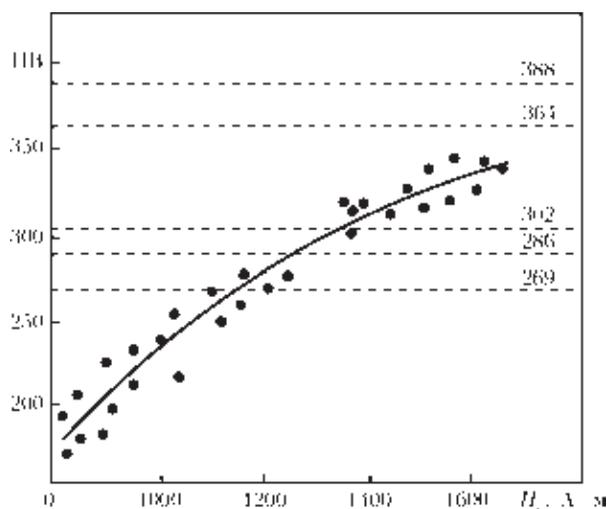


Рис. 2. Зависимость твердости НВ от коэрцитивной силы  $H_c$  для болтов из стали 40Х

Таблица 1. Значения твердости и коэрцитивной силы для шайб из стали 65Г

Характеристика	Состояние изделий		
	«сырое»	закаленное	закалка+отпуск при 400 °С
Твердость HRC <sub>3</sub>	<41	>51	41...51
Коэрцитивная сила $H_c$ , А/м	1200...1650	>2100	1650...2100

дартом. По исследованной группе изделий отбраковка по уровню твердости составляла порядка 9 %, причем практически одинаково как для групп с пониженной твердостью, так и с повышенной.

Исследования показали, что зависимость уровня твердости исходных изделий до термической обработки («сырое» состояние) в зависимости от значений углеродного эквивалента соответствует нормальному распределению. Установлено, что изделия, изготовленные из стали с углеродным эквивалентом на нижнем пределе для данной марки стали при термообработке по существующим режимам имеют уровень твердости несколько ниже нижней границы требований стандарта. В то же время образцы из стали с углеродным эквивалентом на верхнем пределе как правило после термической обработки по существующим режимам технологии имеют более высокий уровень твердости, чем верхняя граница требований стандарта.

На основании этих данных был сделан вывод, что для повышения выхода годной товарной продукции необходимо исходные изделия (в «сыром» состоянии) разделить на три группы в зависимости от значений углеродного эквивалента: «мягкие», «нормальные» и «твердые» (табл. 2). Режимы термической обработки необходимо назначать дифференцированно для каждой группы изделий. Например, для «мягких» изделий необходимо понизить температуру отпуска или, не изменяя температуру отпуска, уменьшить его время. Для «твердых» изделий необходимо повысить температуру отпуска или увеличить его время.

Наиболее приемлемым с технологической точки зрения является изменение времени отпуска.

Применение дифференцированного подхода при назначении режимов термической обработки

Таблица 2. Распределение сталей по группам в зависимости от величины углеродного эквивалента

Марка стали	Значения углеродного эквивалента		
	«мягкие»	«нормальные»	«твердые»
Сталь 35	0,45...0,47	0,48...0,55	0,56...0,58
Сталь 40Х	0,60...0,62	0,63...0,76	0,77...0,80
Сталь 65Г	0,86...0,88	0,89...0,97	0,98...1,00

изделий невозможно без использования неразрушающего контроля.

Для повышения качества товарной продукции можно использовать систему управления качеством [3]. На рис. 3 представлена принципиальная блок-схема системы управления качеством. Система позволяет после каждой технологической операции контролировать уровень твердости изделий и своевременно отбраковывать изделия, не удовлетворяющие заданным свойствам. Изделия, не удовлетворяющие требованиям стандарта, либо переводятся в другую группу товарной продукции, либо назначаются на повторную термическую обработку.

Применение НК после каждой термической обработки позволяет контролировать процессы и работу оборудования для нагрева и охлаждения изделий.

При параллельном поштучном измерении твердости и коэрцитивной силы отбраковка изделий в первом случае составила 9 %, а во втором 10. Причем, отбраковка по нижнему и верхнему пределам практически одинакова в обоих случаях. При партионном контроле измерения твердости брак составляет 7 %. Таким образом, применение неразрушающего поштучного контроля изделий уменьшает риск потребителя на 3 %.

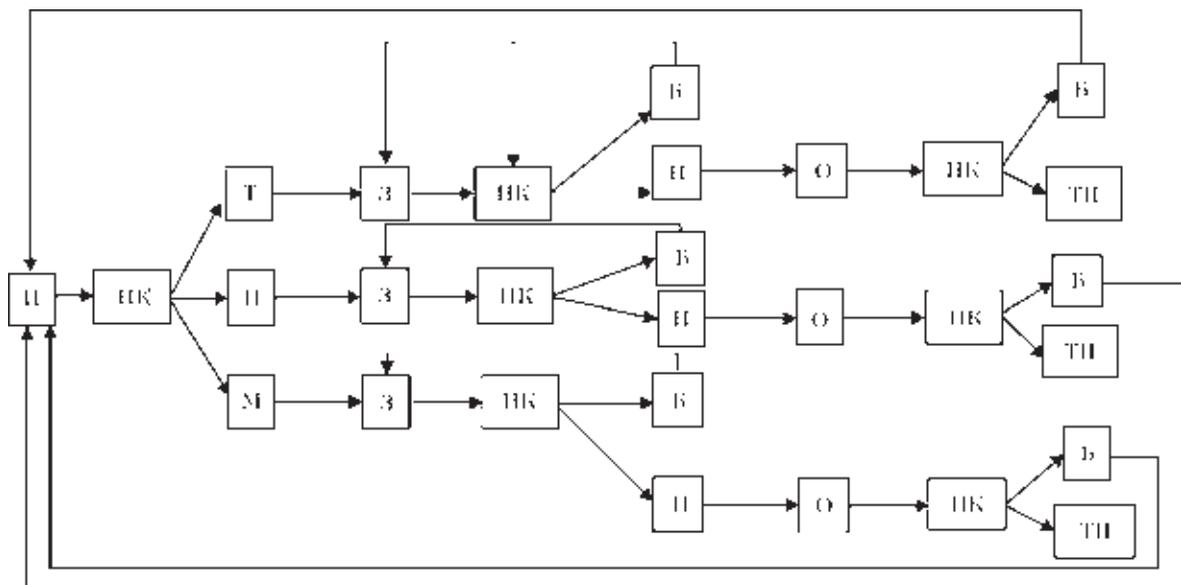


Рис. 3. Блок-схема системы управления качеством: И – исходные изделия; НК – неразрушающий контроль; З – закалка; О – отпуск; Т – «твердые» изделия; М – «мягкие» изделия; Н – нормальные изделия; Б – брак; ТП – товарная продукция



## Выводы

Установлена возможность разделения метизов по группам твердости с помощью коэрцитиметра СИЛА. Рекомендованы интервалы коэрцитивной силы для групп твердости в соответствии со стандартом для болтов и гаек из сталей 35 и 40Х и пружинных гаек из стали 65Г.

Для повышения выхода годной продукции рекомендовано дифференцировать детали в «сыром» состоянии на «мягкие», «нормальные» и «твердые» в зависимости от значений углеродного эквивалента марки стали.

The possibility of by the piece control of metallic products using non-destructive method under industrial conditions was investigated. Magnetic flux-gate method measuring the values of steel coercive force with the help of structure pulse local analyzer (SPLA) was used. Examined objects are M20x1.5 bolts from steel 35 and 40Kh and spring washer from steel 65G. The products were quenched in oil with further tempering. Regression equations, combining product hardness (HRCe) with coercive force value were proposed. Correlation factor made not less than 0.8. The ranges of coercive force values, in which steel hardness can meet the standard requirements, were determined. It is shown that reduction of product rejection on hardness requires consideration of a carbon equivalent value. Relationship between carbon equivalent and hardness was determined. Differentiation of tempering temperature depending on the carbon equivalent was proposed. A principle scheme of quality control at manufacture of metallic products was developed. It includes product NDT before heat treatment, consideration of level of the steel carbon equivalent and final NDT. Ref.3, Tables 2, Figures 3.

*Keywords* : non-destructive testing, flux-gate transducer, metal products, steel hardness, correlation equation, heat treatment, delivery control

Показано, что поштучный контроль метизов снижает возможность получения потребителем нестандартной продукции.

1. Гаркунов Э. С. Контроль качества отпущенных изделий из среднеуглеродистой стали с использованием приставных электромагнитов // Дефектоскопия. – 1987. – № 2. – С. 30–32.
2. Максимов А. Б. Определение механических свойств арматурной стали неразрушающим методом // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2008. – № 3. – С. 70–73.
3. Максимов А. Б., Гофман Л. Д., Кибалов А. А. Система управления качеством производства остряковых рельсов // Нові матеріали і нові технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 125–128.

Поступила в редакцию  
03.03.2013

## Вниманию специалистов!

Во втором квартале 2014 г. запланирована к изданию книга «**Практические рекомендации Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины по ремонту сваркой магистральных трубопроводов без вывода из эксплуатации**» / Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, А. С. Миленин. — Киев, Международная ассоциация «Сварка», 2014. (8 п. лист.).

Рекомендации посвящены вопросам оценки несущей способности магистральных газо- и нефтепроводов с обнаруженными характерными технологическими и эксплуатационными дефектами формы и несплошности материала, а также типичным методам ремонта сваркой без вывода из эксплуатации. В частности, обобщены основные аспекты актуальных отечественных и зарубежных нормативных документов, современные подходы механики разрушения и численного анализа напряженно-деформированного состояния сварных конструкций, новейшие разработки специалистов Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В результате сформулированы практические инженерные алгоритмы, позволяющие оценивать фактическую степень поврежденности участков магистральных трубопроводов на основе данных технической диагностики, планировать ремонт дефектных трубопроводных элементов без вывода их из эксплуатации с позиций эффективности и безопасности проведения работ, прогнозировать ресурс эксплуатации участков трубопровода после ремонта.

Для инженерного персонала организаций, эксплуатирующих магистральные трубопроводы, специалистов неразрушающего контроля и технической диагностики трубопроводных систем, преподавательского состава высших учебных заведений соответствующего профиля, научных работников, занимающихся вопросами прочности сварных конструкций и методами восстановления их несущей способности.

*Заказы на книгу направлять в редакцию журнала ТД и НК.*

# СПЕКТРАЛЬНЫЙ АКУСТИКО–ЭМИССИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПЛАСТИЧНОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ХРОМА

**А. И. ШЕВЧЕНКО**

Гос. астроном. обсерватория НАНУ, 03680, г. Киев, ул. Академика Заболотного, 27. E-mail: soi\_51@ukr.net

**М. А. ОВСИЕНКО, Л. Ф. ХАРЧЕНКО**

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

Цель работы – контроль пластической деформации низколегированных сплавов хрома. Разработан спектральный акустико–эмиссионный метод контроля пластичности. Проанализированы определения параметров акустико–эмиссионных сигналов в нормативной литературе и их взаимосвязь с физическими величинами, которые измеряются во время нагруженного разрушения. Разработана методика акустико–эмиссионных исследований образцов сплава хрома. Исследовали следующие сплавы: ВХ 2К + 0,4 % Re + 0,1 % Zr – литой, пластичный, крупнозернистый; ВХ 2К + 0,4 % Re + 0,1 % Zr – деформированный, пластичный; ВХ 2К + 0,4 % Re – литой, пластичный, мелкозернистый; ВХ 2К + 0,06 % N – литой; Сг + 0,3 % La – деформированный. Приведены акустико–эмиссионные спектрограммы, которые свидетельствуют об изменениях структуры материала образца под воздействием нагрузки. Спектрограммы дают возможность использовать приведенную методику с целью анализа пластических характеристик низколегированных сплавов хрома и определения влияния легирующих примесей. Наиболее пластичными являются образцы ВХ 2К + 0,4 % Re и Сг + 0,3 % La, в спектре которых присутствует прямоугольный участок, и диапазон этого участка больше, чем у контрольного образца. Библиогр. 13, табл. 2, рис. 2.

*Ключевые слова:* испытание сплавов, пластичность низколегированных сплавов хрома, спектры акустико–эмиссионных сигналов

Задачей исследования является разработка методики испытания сплавов хрома с примесями, которые повышают пластичность хрома. Использование этих сплавов является актуальным при разработке конструкционных материалов для ядерной энергетики. Для реализации задачи провели исследование сигналов акустической эмиссии (АЭ) [1–5] спектроанализатором СК4-59 (ЕЭ1.406.055 ТУ) при нагружении образцов из разных сплавов на разрывной машине 1231 У10. Исследовали плоские образцы длиной 30 мм и шириной в узкой части 3 мм. Скорость движения захватов 1 мм/мин. К плоскости образца в узкой части прикрепляли АЭ преобразователь. Использовали преобразователь П113(0,2-0,5)·3 с полосой частот 0,2...2,0 МГц, диаметром рабочей части 10 мм и усилитель САА-06 из комплекта прибора АФ-15. В качестве контактной смазки между преобразователем и образцом использовали индустриальное масло И-40. Химический состав низколегированного сплава на основе хрома ВХ-2К, мас. %: 0,3...0,4 La; 0,3...0,5 Ta; 0,3...0,5 V; 0 Re; 0,001...0,01 C; 0,001...0,03 O; 0,002...0,1 N; 0,001 H [6].

Определим некоторые производные единиц акустической эмиссии [1–4].

Для одного и того же физического процесса АЭ применяется 9 единиц измерения. В ДСТУ 227 [2] АЭ определяется как «излуче-

ние объектом испытания акустических (упругих) волн».

По литературным данным предельная чувствительность измерений представляет  $1 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>2</sup>, что соответствует выявлению трещин длиной 1 мкм на толщину трещины 1 мкм. Энергия отдельного импульса составляет от  $10^{-9}$  до  $10^{-5}$  Дж.

В процессе механического разрушения во время образования трещин происходят два физических явления, которые характеризуются тремя физическими величинами, имеющими две единицы измерения: первое – это высвобождение механической энергии, одна физическая величина – энергия (Дж); второе – превращение энергии механического разрушения в энергию акустической волны и распространение акустической волны. Физические величины – звуковая энергия (Дж) и звуковое давление (Па). Не вся энергия разрушения может перейти в энергию звуковой волны, часть может перейти в тепловую энергию.

Измерительный преобразователь фиксирует изменения толщины пьезокристалла под давлением акустической волны, которая проходит из образца в пьезокристалл. Анализ параметров измерений, сделанный авторами, показывает следующее. Параметр акустического давления оценивается (табл. 1, п.п. 5–7) единицей с размерностью В/с. Только параметр «энергия сигнала АЭ» (табл. 1, п.п. 8, 9) адекватно оценивает энергетические па-



Таблица 1. Примеры определения АЭ согласно ДСТУ 2374

Номер	Параметр АЭ	Символ, определение единицы измерения и пояснение	Единица измерения
1	Число импульсов	$N_{\Sigma} = n/\Delta t$ (число $n$ зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за интервал времени наблюдения $\Delta t$ или обобщенного параметра нагружения)	1 имп.
2	Суммарный подсчет	$N = n(A > A_0)/\Delta t$ (число $n$ зарегистрированных превышений $A$ импульсами АЭ установленного уровня дискриминации (ограничения) $A_0$ за интервал времени наблюдения $\Delta t$ или обобщенного параметра нагружения)	–"
3	Активность	$\Sigma = n/\tau$ (число $n$ зарегистрированных импульсов АЭ за единицу времени $\tau$ или обобщенного параметра нагружения)	1/с
4	Скорость подсчета	$\dot{N} = N/\Delta t$ (отношение суммарного подсчета АЭ $N$ к интервалу времени наблюдения $\Delta t$ или обобщенного параметра нагружения)	–"
5	Уровень сигналов	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} A_{\tau_i}^2}$ (среднее квадратичное значение сигнала АЭ в рассматриваемый интервал времени)	В/с
6	Амплитуда	$U = \max(A/\Delta t)$ (максимальное значение сигнала АЭ в течение выбранного интервала времени)	–"
7	Амплитудное распределение	$U/\Delta t$ (распределение амплитуд АЭ за следуемый интервал времени)	–"
8	Энергия сигнала	$W$ (энергия, которая выделяется в рабочей полосе частот в интервале времени)	Дж/с
9	Спектральная плотность сигналов	Распределение сигналов АЭ по частотам энергии	–"

раметры физического процесса возникновения трещин, его размерность Дж/с.

Но и в этом случае измеряется не механическая энергия разрушения материала, а энергетический параметр акустической волны.

Для нахождения корреляции между частотой импульсов и энергией разрушения материала необходимо провести сложные физические исследования. Поэтому в качестве анализируемой информации выбраны спектры сигналов АЭ.

Испытание проводили при температуре 25 °С. Признаком хорошей пластичности можно назвать наличие огибающей сигналов АЭ одинаковой высоты без разрывов (в форме прямоугольника). Необходимо отметить, что осцилляции (импульсы) единичных актов АЭ могут быть с разной частотой на протяжении всего времени испытаний. Тот факт, что импульсы попадают в прямоугольный участок спектра, свидетельствует не о последовательности их появления во времени, а о том, что процесс имеет близкую физическую природу, близкие частоты и энергии источников акустических волн.

На образцах пластического хрома (№ 2, 3, 5) на спектрограмме (рис. 1) отмечаются участки сплошного спектра практически одинаковой амплитуды. Расшифровка акустических сигналов, зависящих от большого количества факторов, достаточно сложна. Если определять координаты трещин, то этот метод себя оправдывает. Но если исследовать структуру металла, то для этого необходимо провести большое количество испытаний

на практически идентичных образцах с целью выявления закономерностей.

Частоты, имеющиеся в излучении АЭ в конце испытания, будут записываться на экране осциллографа в спектрограмме в районе тех частот, которые были в начале испытания, как это и отмечено на рис. 1 на образце № 2 с рением. В конце эксперимента участки спектрограммы заполнялись импульсами АЭ с частотами от 94 до 157 кГц, но с большей амплитудой импульсов. Во время эксперимента участки спектра с меньшими частотами могут заполняться позже по времени, чем участки с высокими частотами. Поскольку сигналы с такой частотой имеют большую амплитуду, то их можно заметить в конце эксперимента на экране. Как известно, АЭ происходит за счет деформирования кристаллитов в поликристалле.

При деформировании микрообъектов одинаковой структуры может происходить излучение импульсов одинаковой частоты, но разной энергии.

Еще один параметр может свидетельствовать о скорости ползучести – скорость подсчета АЭ (1/с) [7]. Аналогом скорости подсчета АЭ (1/с) [1–5] в настоящем методе является максимальная частота, на которой заканчивается прямоугольный участок спектра: для образца № 2 это 600 кГц, № 3 – 430. Таким образом, большие частоты, на которых заканчивается прямоугольный участок, могут свидетельствовать о большей пластичности металла за счет большей накопленной энергии нагрузки образца. На рис. 2 показана огибающая сигнала при хорошей пластичности металла.

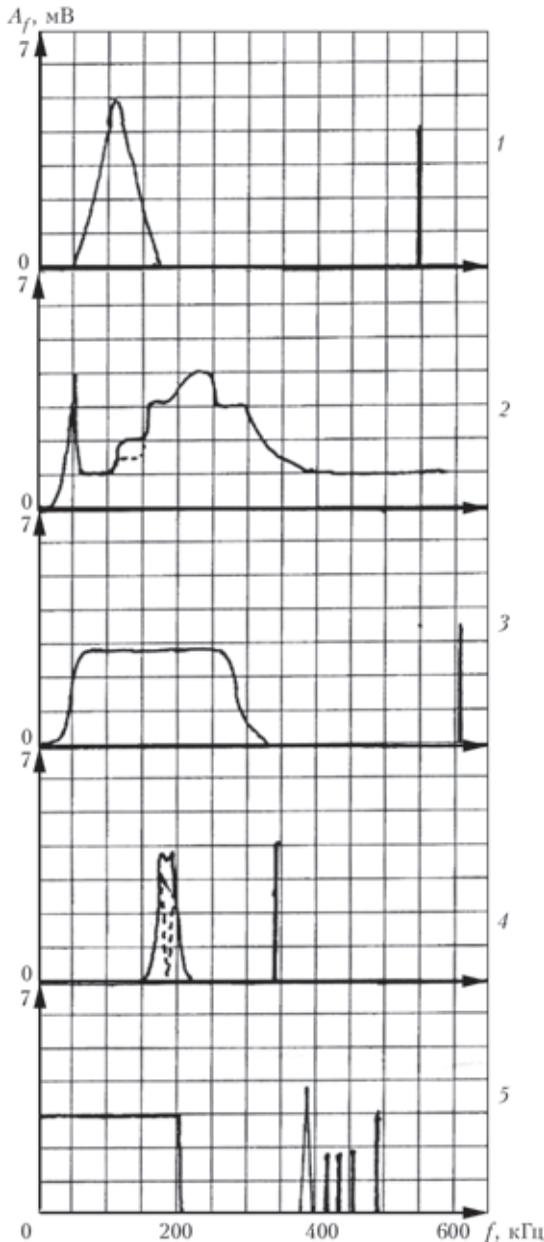


Рис. 1. Спектры АЭ сигналов (1–5 – номера образцов)

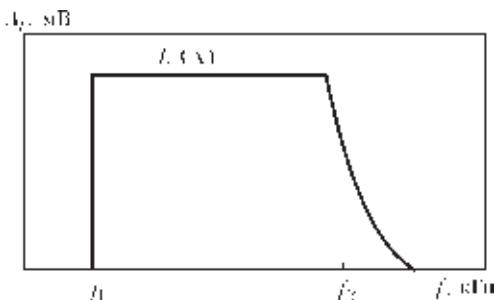


Рис. 2. Схематическое представление формы огибающей спектрограммы сигнала при хорошей пластичности металла

По оси абсцисс – частота  $f$ , кГц, по оси ординат – амплитуда  $A$ , мВ;  $f_1, f_2$  – начало и конец прямоугольного диапазона частот;  $L(\Delta)$  – длина прямоугольного участка диапазона спектра с одинаковой амплитудой от  $f_1$  до  $f_2$  (кГц). Вывод относительно пластичности металла делается по двум параметрам: длина сплошного спектра; величина мини-

муму начала сплошного спектра. Анализ проводили в два этапа. В качестве образца с лучшей пластичностью принимается такой, у которого длина сплошного спектра наибольшая и меньше нарушений сплошной линии. Если образцы характеризуются одинаковыми длинами линии  $L(\Delta)$ , лучшим выбирается тот, у которого величина минимальной частоты  $f_1$  меньше. В качестве стандартного образца для градуировки выбирается образец с составом, полученным по стандартизованным технологиям.

С большой вероятностью можно считать, что в этом методе четко определяется интервал импульсов с одинаковой частотой и одинаковой энергии  $L(\Delta)$ , т. е. можно оценивать наличие структурных составляющих (зерен, кристаллитов) [8]. Наличие участков сплошного спектра может свидетельствовать о протекании процесса пластической деформации [9–13]. В настоящее время определение параметров, опосредствованно определяющих пластическую деформацию металлов, проводится в соответствии с ГОСТ 1497–84 [12]. Пластическая деформация характеризуется следующими параметрами: модулем упругости  $E$ , Н/м<sup>2</sup>; пределом текучести условной с допуском на величину пластической деформации  $\sigma_{0,2}$ , Н/мм<sup>2</sup>; пределом текучести физической (нижняя граница текучести)  $\sigma_f$ ; относительным сужением после разрыва  $\psi$ , мм<sup>2</sup>; относительным удлинением  $\delta$ , %; действительным сопротивлением разрушению  $S_k$ . В качестве характеристики, наиболее близкой (аналогичной) той, что используется в разработанном методе, выбрана характеристика  $\psi$ .

В ГОСТ 1497–84 термин «пластическая деформация» используется, но определения этого физического явления и его единицы измерений не приведено, даны определения близких физических параметров и характеристик. Неоднозначно трактуется это явление и для разных металлов. В работе [11] отмечается положительное влияние на пластичность хрома легирования добавкой рения, что нашло подтверждение и в настоящей работе. По данным работы [13] для монокристалла хрома разных ориентаций при пластической деформации при  $T < 300$  К наблюдается двойникование, которое увеличивается при понижении температуры. При комнатной температуре пластическая деформация монокристаллов осуществляется путем скольжения [13]. Погрешности измерения пластической деформации следующие:  $\delta_l$  из-за неплотного прилегания преобразователя к образцу составляет 2 %;  $\delta_f$  за счет измерения частоты на спектроанализаторе 3 %; за счет измерения амплитуды 5 %;  $\delta_v$  за счет неравномерной скорости движения захватов 2 %. Предельная относительная погрешность  $\delta_n$  измерений пластической деформации



Таблица 2. Результаты исследований образцов сплавов

Номер	Состав образца	Результаты испытаний	Диапазон спектра, кГц
1	VX 2K + 0,06 % N	Разрыв двух образцов происходил на частоте 545 кГц. На одном образце была трещина	50...115 ( $\Delta = 65$ )
2	VX 2K + 0,4 % Re	Разрыв образца на частоте 350 кГц	94...600 ( $\Delta = 506$ )
3	Cr + 0,3 % La	Разрыв образца на частоте 630 кГц	105...430 ( $\Delta = 325$ )
4	VX 2K + 0,4 % Re + 0,1 % Zr	Исходный образец был с трещиной. Разрыв образца на частоте 350 кГц	156...215 ( $\Delta = 59$ )
5	VX 2K + 0,4 % Re + 0,1 % Zr	Разрыв образца произошел на частоте 400 кГц	0...219 ( $\Delta = 219$ )

$L(\Delta) - 6,8\%$ . Результаты контроля по этой методике подтверждены результатами механических испытаний сплавов хрома с идентичным количеством примесей. Сравнение испытания стандартным методом и испытания по разработанной методике дает хорошую корреляцию характеристик  $\psi$ ,  $\delta$  и  $\sigma_{0,2}$  для сплава № 2 (табл. 2); для сплава № 5 –  $\psi$  и  $\delta$ . Сплав № 3 также показал хорошую пластичность (Н. П. Бродниковский, ИПМ НАНУ – по результатам испытаний).

### Выводы

Разработана методика исследований спектров АЭ сигналов, регистрируемых на исследуемых образцах сплавов хрома.

В данной методике АЭ сигналы, поступающие на преобразователь, анализируются на экране спектроанализатора СК4-59.

Наиболее пластичными являются образцы из сплавов VX 2K + 0,4 % Re и Cr + 0,3 % La, у которых особенностями спектра АЭ сигналов являются следующие факторы: наличие прямоугольного участка, наибольший диапазон частот этих участков соответственно 506 и 325 кГц, а также наличие вертикальной линии (импульса) в диапазоне частот больше 500 кГц. Верхняя линия прямоугольника, параллельная оси абсцисс, может свидетельствовать о равенстве энергии АЭ импульсов, а это, в свою очередь, о равенстве прилагаемой нагрузки и наличии участка с пластической деформацией.

The objective of the work is monitoring plastic deformation of low-alloyed chromium alloys. A spectral acoustic emission method of ductility monitoring was developed. The paper analyzes determination of parameters of acoustic-emission signals in normative documents and their inter-relation with physical values, which are measured during fracture under loading. A procedure of acoustic emission studies of chromium alloy samples was developed. The following alloys were studied: VKh 2K + 0.4%Re + 0.1%Zr – cast, ductile coarse-grained; VKh 2K + 0.4%Re + 0.1%Zr – wrought, ductile; VKh 2K + 0.4%Re – cast, ductile, fine-grained; VKh 2K + 0.06% N – cast; Cr + 0.3% La – wrought, fine-grained. Acoustic-emission spectrograms are given, which are indicative of changes in sample material structure under loading. Spectrograms allow applying the above procedure to analyze ductility characteristics of low-alloyed chromium alloys and determine the influence of alloying impurities. The most ductile are samples of VKh 2K + 0.4%Re and Cr + 0.3%La, in which the spectrum has a rectangular section, and the range of this section is greater than that of the reference sample. 13 Reference, 2 Table, 2 Figures.

**Key words:** alloy testing, low-alloyed chromium alloy ductility, spectra of acoustic emission signals

Поступила в редакцию  
11.10.2013



Центр теплового контроля при Украинском обществе  
неразрушающего контроля и технической диагностики

## ТЕПЛОЙ И ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

### Методы теплового контроля позволяют обнаружить:

нарушение изоляции ограждающих конструкций  
зданий и сооружений;

степень утонения стенок трубопроводов;

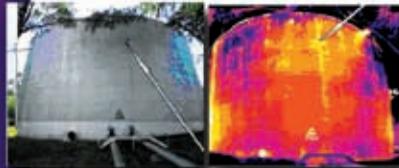
несплошности в полимерных  
и композитных материалах;

наличие отслоений газотермических покрытий;

нарушение теплоизоляционных  
свойств печей различного назначения, дымоходов  
и других объектов теплоэнергетического комплекса;

теплопотери объектов гражданского  
и промышленного строительства;

неисправности в работе электрооборудования.



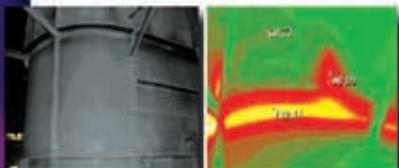
Видимое и тепловое  
изображение резервуара



Видимое и тепловое  
изображение  
магистрального трубопровода



Видимое и тепловое  
изображение фасада  
жилого здания



Видимое и тепловое  
изображение печи

### Наши специалисты предоставляют весь комплекс услуг по тепловому контролю элементов конструкций и механизмов

выполнение термографического контроля качества,  
расшифровка полученных данных  
с выдачей информации  
о месторасположении и размерах дефектов;

разработка и внедрение необходимого  
тепловизионного оборудования;

помощь в принятии решений  
о необходимости ремонта  
и дальнейшей эксплуатации объектов;

обучение и аттестация персонала;

обеспечение необходимой  
нормативной документацией и литературой.

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины  
Украинское общество неразрушающего контроля  
и технической диагностики

e-mail: office@paton.kiev.ua



## ПОРТАТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА (РТС-П)

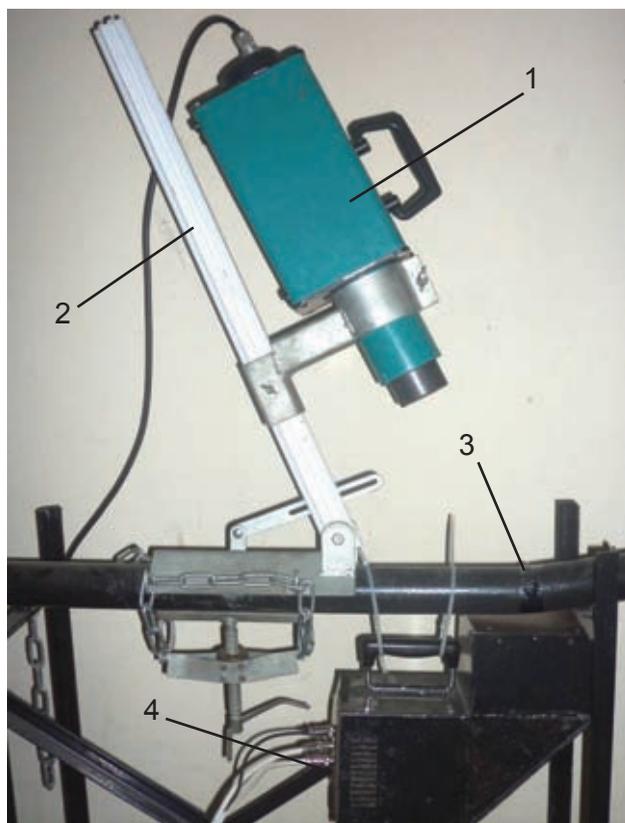
Рентгентелевизионная система РТС-П поставляется для рентгеновского контроля различных объектов, толщина металла которых позволяет использовать импульсные рентгеновские аппараты.

**В комплекте:** электронное оборудование, ноутбук со специализированным программным обеспечением

- 1 – излучатель рентгеновского аппарата
- 2 – штатив
- 3 – контролируемое сварное соединение
- 4 – детектирующее рентгеновское устройство



Цифровое рентгентелевизионное изображение сварного соединения трубы на экране компьютера



Просвечивание стальной трубы  $\varnothing$  57 мм с использованием РТС-П

### Преимущества РТС-П перед другими рентгентелевизионными системами:

- высококонтрастный рентгенооптический преобразователь;
- высокая радиационная чувствительность при низком шуме;
- высокое разрешение и стабильность изображения;
- низкая инерционность;
- возможность контроля движущихся объектов;
- возможность использования с импульсными рентгеновскими аппаратами;
- высокоэффективная цифровая обработка изображения;
- малые размеры;
- низкая стоимость

E-mail: office@paton.kiev.ua

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПРОГНОЗ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА, ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ – КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ\*

Магнитометрические измерения, исторически составившие суть метода коэрцитивной силы (МКС), изначально выполнялись скорее всего для сугубо исследовательских целей в задачах, которые, по современным представлениям, отнесли бы наверное к фундаментальной науке. С появлением и развитием промышленности сфера применения метода распространилась на оценку рукотворного (технологического) разнообразия состояний и свойств новой металлопродукции и складывавшуюся параллельно с этим область прикладных задач. В течение последних тридцати лет мы осуществили расширение применения МКС на диагностические задачи оценки уже естественного эксплуатационного разнообразия состояний металла, возникающего в течение срока службы вследствие усталостной деградации. Тем самым инициирован скачок в развитии представлений самого МКС и уровня связанного с ним специфичного магнитоизмерительного приборостроения. А также – и это главное – обусловлен пока не очень осознанный специалистами рывок в развитии технической диагностики металлов, поскольку применение коэрцитиметрии для оценки состояния металла в течение эксплуатации позволило реализовать сразу и на практическом уровне недоступный до этого вообще контроль усталости конструкций и оборудования как локально, так и в целостном представлении. Причем, все это не только качественно, но и количественно. Не говоря об открывшемся потенциале возможностей уточнения на этой основе особенностей механики разрушения и процессов становления и развития усталостной деградации как в мо-

дельном, так и реальном эксплуатационном представлении.

Коэрцитивная сила показала высокую практическую, а особенно информационную эффективность в оценке уровня накопления усталостной микроповрежденности металла в течение эксплуатации. При продвижении металла от исходного состояния до усталостного разрушения (в конце срока службы) величина коэрцитивной силы  $H_c$  возрастает на сотни процентов (!) от некоторого исходного состояния  $H_{c_0}$  до соответствующего предельного состояния  $H_c^B$ . При этом величины  $H_{c_0}$  и  $H_c^B$  оказались своеобразными новыми граничными физическими константами для каждой марки металла или ее модификации. Эта замечательная особенность позволяет по текущим значениям коэрцитивной силы металла  $H_{c\text{текущ}}$  довольно точно оценить действительный отработанный ресурс по степени отдаления  $H_{c\text{текущ}}$  от начального граничного состояния  $H_{c_0}$  и также эффективно выполнить прогноз остаточного ресурса по степени и скорости приближения  $H_{c\text{текущ}}$  к граничной предельной величине-константе  $H_c^B$ , т.е. по реальному текущему физическому состоянию металла. В процессе обобщения практики диагностических коэрцитиметрических измерений созданы простые в работе автономные, портативные коэрцитиметры-структуроскопы серии КРМ-Ц с приставным преобразователем, фактически не требующие зачистки металла, нечувствительные к шероховатостям и кривизне поверхности, работающие через слой защитного покрытия порядка 6 мм и более. При этом измерения можно выполнять по металлу с температурой от любых природных отрицательных до горячих поверхностей в

\* Статья на правах рекламы

сотни градусов. А должным образом подготовленным прибором можно работать в воде.

Почти 30-летняя практика коэрцитиметрического усталостного контроля конструкций и оборудования в совокупности с многочисленными разнообразными стендовыми испытаниями образцов позволяет сегодня уже структурировать, представлявшуюся до сих пор целостной, величину измеряемой коэрцитивной силы как совокупность составляющих, каждая из которых по-своему меняется в процессе срока службы в зависимости от сочетания эксплуатационных факторов и в зависимости от интенсивности усугубляющего влияния каждого из этих воздействий. Это улучшает понимание текущего состояния диагностируемого объекта, конкретизирует главенствующие факторы – причины этого состояния. А также делает еще более точным и изящным коэрцитиметрический эксплуатационный прогноз на последующую стадию срока службы. Зная весомость факторов деградации, мы учитываем в прогнозе не только совокупную динамику ухудшения механических свойств металла, но и действенность, и динамику отдельных причин усталостной деградации.

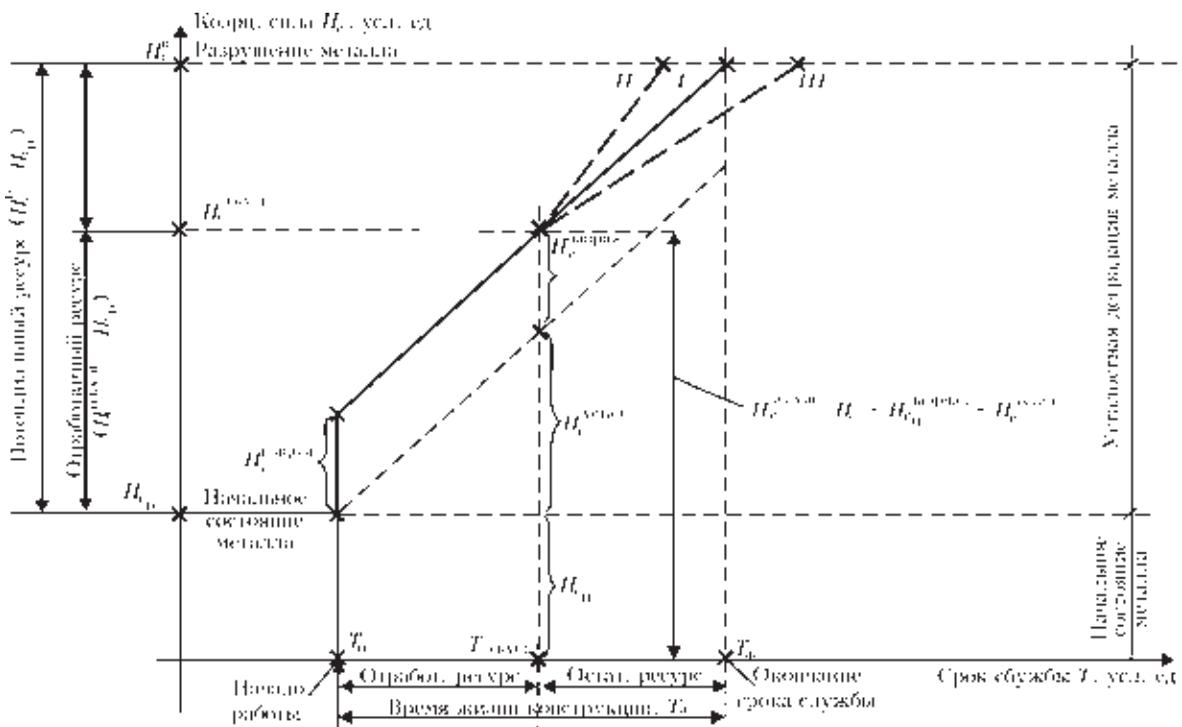
Текущее значение величины коэрцитивной силы  $H_c^{текущ.}$  можно условно представить суммой нескольких основных составляющих. Это исходная величина  $H_{c0}$ , зависящая от химического и фазового состава, а также структурного состояния металла. И две компонен-

ты, зависящие, соответственно, от величины внутренних напряжений  $H_c^{напряж.}$  и от уровня накопленной необратимой микроповрежденности металла в процессе его деградации по усталостному типу  $H_c^{устал.}$ :

$$H_{c0} \leq H_c^{текущ.} = (H_{c0} + H_c^{напряж.} + H_c^{устал.}) \leq H_c^B. \quad (1)$$

Это выражение по сути описывает область определения значений коэрцитивной силы данной марки металла  $[H_{c0}, H_c^B]$ . На рисунке показано, как изменяются составляющие  $H_c^{текущ.}$  в процессе срока службы.

Величина  $H_{c0}$  является физически наименьшей из тех значений  $H_c$ , которые природно могут быть у металла данной марки. В первом приближении можно считать, что в процессе срока службы составляющая  $H_{c0}$  остается неизменной. Составляющая  $H_c^{напряж.}$  зависит от совокупности эксплуатационных нагрузок, собственных конструкционных нагрузок и монтажных напряжений, а также фазовой нестабильности металла в процессе службы. При устоявшемся режиме работы эта компонента у правильно спроектированной в прочностном плане конструкции колеблется около некоторого установившегося уровня в пределах упругих (обратимых) деформаций. Величина  $H_c^{устал.}$  нарастает от нулевого значения в процессе нормативной эксплуатации в течение всего срока службы неуклонно и постоянно, чаще линейно как результат постоянно



Усталостная деградация металла в течение срока службы в коэрцитиметрическом отображении

накапливающейся усталостной микрповрежденности металла. Больше, чем  $H_c^B$ , величина коэрцитивной силы  $H_c^{\text{текущ.}}$  у данной марки металла быть не может. Это физическая предельная константа, соответствующая разрушению металла. Она своя для каждой марки металла, равно как и минимальное (исходное) значение  $H_{c_0} = H_{c_{\text{мин}}}^{\text{текущ.}}$ . Разность  $\Delta H_c^{\text{потенц.}} = H_c^B - H_{c_0}$  характеризует начальный (потенциальный) ресурс. В течение жизни конструкции  $T_{\text{ж}}$  величина  $H_c^{\text{текущ.}}$  в зонах концентрации напряжений увеличивается от минимального своего значения  $H_{c_0}$  до максимального  $H_c^B$ . Этот рост  $H_c^{\text{текущ.}}$  происходит за счет появления составляющих  $H_{c_{\text{напряж.}}}$  и  $H_{c_{\text{устал.}}}$ , а также непрерывного эксплуатационного роста последней. Слагаемое  $H_{c_{\text{напряж.}}}$  отображает упругие (обратимые) изменения в металле на фоне непрерывно накапливающейся усталостной поврежденности.

По мере накопления пластических деформаций и микрповрежденности металла составляющая  $H_{c_{\text{устал.}}}$  растет до своего возможного гипотетического наибольшего значения  $H_{c_{\text{устал.}}}^{\text{max}} = \Delta H_c^{\text{потенц.}} = H_c^B - H_{c_0}$ . Такое значение параметр  $H_{c_{\text{устал.}}}$  принимает в полностью разгруженном металле с максимальным уровнем накопленной микрповрежденности во всем его объеме, но при отсутствии напряжений в нем. Такой и совсем не виртуальный металл не способен выдерживать даже незначительные механические нагрузки, и, что важно, при этом он безупречен для любого современного дефектоскопического метода, так как поврежден на микроуровне, неподконтрольном дефектоскопии.

В результате такого коэрцитиметрического отображения усталостных процессов в течение срока службы металла реализуется возможность технического диагностирования металла по его реальному текущему состоянию, а не по результатам теоретического расчета прочности, который всегда есть и будет в разной степени субъективно-абстрактным, поскольку отображает только относительный уровень наших знаний из области теоретической механики, механики разрушения и сопротивления материалов. В величину  $H_c^{\text{текущ.}}$  вносит свой вклад магнитный момент каждого атома контролируемого металла в зависимости от его состояния, определяемого текущей нагруженностью и накопленной усталостью. Поэтому из всех НК-методов коэрцитиметрия

более адекватно отображает механическое состояние металла реальной конструкции. И поправки в текущие прочностные расчеты, сделанные на основе коэрцитиметрической оценки состояния металла, сделают такие расчеты более адекватными его реальным механическим свойствам.

При этом важно понимать, что значения  $H_c^{\text{текущ.}}$ , превышающие величину  $H_c^T$ , вовсе не означают, что в конструкции действуют напряжения выше предела текучести. Как следует из выражения (1) и особенно из рисунка, в таких зонах могут быть практически нулевые напряжения. Но при высоком уровне накопленной усталостной поврежденности эксперт всегда получит здесь высокие значения  $H_c^{\text{текущ.}}$  (причем необратимого характера) даже при гипотетически нулевых внутренних напряжениях в металле за счет составляющей  $H_{c_{\text{устал.}}}$ . Металл,  $H_c^{\text{текущ.}}$  которого почти равно  $H_c^B$ , способен разрушиться при напряжениях в нем много меньших его предела текучести  $\sigma^T$ , как это видно из (1) и как это следует из современных представлений механики разрушения и усталости металлов, потому что его основа – кристаллическая решетка – в значительной мере повреждена или изменена усталостными микродефектами.

Обобщенное аналитическое представление зарождения, развития, накопления усталостных изменений металла в коэрцитиметрическом отображении наглядно иллюстрируется его графической аналогией на рисунке. В момент времени начала срока службы  $T_0$  величина коэрцитивной силы минимальна и равна  $H_{c_0}$ . В этот момент появляются эксплуатационные нагрузки, дающие прирост, обозначенный как  $H_{c_{\text{напряж.}}}$ . Одновременно начинаются необратимые усталостные изменения  $H_{c_{\text{устал.}}}$ . Измерения текущей величины коэрцитивной силы  $H_c^{\text{текущ.}}$  в некоторой промежуточной точке срока службы  $T_{\text{ж}}$  представляются выражением (1), как  $H_c^{\text{текущ.}}(T) = H_{c_0} + H_{c_{\text{напряж.}}}(T) + H_{c_{\text{устал.}}}(T)$ , что хорошо видно из рисунка. Если режим нагружения с какого-то промежуточного момента  $T_{\text{текущ.}}$  останется прежним, то и дальнейшая деградация по усталостному типу будет продолжаться с имевшейся до этого интенсивностью по типу I. При более тяжелом режиме – по типу II, и по типу III – при менее тяжелом режиме нагружения. Графическое линейное представление усталостной

диаграммы  $H_c(T)$  на рисунке, включая разновидности II и III – достаточно условно, но это эффективнее, чем все, что имеется до сих пор в практическом контроле усталости. Если проводить в течение срока службы систематический периодический мониторинг, то вид характеристики  $H_c(T)$  будет существенно ближе к реальному в сравнении с принятым на рисунке линейным приближением.

Соответственно уточнится и прогноз остаточного ресурса. Если же разместить на контролируемом объекте систему датчиков коэрцитиметрического мониторинга металла в зонах концентрации напряжений, то погрешность прогнозирования остаточного ресурса будет минимально возможная (с позиций вероятностного статистического оценивания). Из рисунка хорошо видно, как скорость накопления усталостных изменений в металле влияет на срок службы. И как знание предыдущей скорости деградации в момент времени  $T_{\text{текущ}}$  позволяет выполнить прогноз остаточного ресурса по фактическому состоянию металла на этот момент, а не по абстрактным расчетным соображениям. Металл с величиной коэрцитивной силы, равной  $H_{c0}$  всегда можно найти в ненагружаемой части конструкции, а с величиной  $H_c^B$  – в зонах с признаками усталостного разрушения или на образце металла, нагруженном на стенде растяжением до предела прочности.

Уточним также, что коэрцитиметрическое отображение усталости безоговорочно эффективно для режимов эксплуатации, характерных для малоциклового и статической усталости. Многоцикловая усталость сквозь призму МКС оценивается столь же очевидно только на конечной стадии, а все предыдущие ее фазы классифицируются этим методом по несколько иным критериям, что требует отдельного обсуждения.

Простота аналитического (1) и графического (рисунок) представлений зарождения и

развития усталости металла в течение срока службы в коэрцитиметрическом отображении является еще одним практическим достоинством для пользователей. В то же время физическая глубина этих представлений объективно бесконечна, но основные проявления проверены практической диагностикой многих типов объектов в течение нескольких десятилетий. А также большим объемом стеновых испытаний многих образцов конструкционных марок сталей широкого и специального назначения. Эти две стороны целостной коэрцитиметрической трактовки процесса деградации металла по усталостному типу – только начальный, но эффективный и хорошо проверенный шаг в постановке усталостного контроля на широком практическом уровне как неотъемлемой, а в будущем, и главенствующей составляющей технической диагностики.

Современная техническая диагностика и неразрушающий контроль вместо декларируемой оценки работоспособности собственно металла, в действительности занимаются оценкой уровня отдельно взятых эксплуатационных факторов. Тогда как текущее состояние металла зависит от совокупности всего множества усугубляющих эксплуатационных воздействий.

Из всего набора параметров и методов контроля состояния металла коэрцитивная сила сегодня по своей физической сути представляется наиболее обобщающим интегральным параметром оценки именно совокупной поврежденности металла на микроуровне, т. е. диагностические возможности этого параметра существенно шире усталостного контроля. Поэтому дальнейшая и растущая востребованность коэрцитиметрии объективна и обещает только развитие понимания текущего состояния металла, но никак не его консервацию на очередном уровне.

Более подробно см. сайт [www.snr-ndt.com](http://www.snr-ndt.com).

*Г. Я. Безлюдько, Б. Е. Попов, Р. Н. Соломаха  
ООО «Специальные Научные Разработки»*

## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЭНЕРГОАУДИТА \*

В настоящее время во всем мире уделяется значительное внимание рачительному использованию топливно-энергетических запасов, происходит переход к новым технологиям производства энергии и созданию конструкций с повышенными параметрами энергоэффективности.

Вследствие усложнения технологий и конструкций, а также прогрессирующей изношенности основных фондов увеличивается количество техногенных аварий и катастроф. При этом более 60 % из них происходит из-за отклонения их технических характеристик или режимов функционирования от штатных значений.

Реализация задач увеличения энергоэффективности сводится к созданию развитой системы проведения энергетического аудита объектов, использующих топливно-энергетические ресурсы, и выдаче рекомендаций о способах их экономии. Без знаний о реальном техническом состоянии объекта, его инструментального обследования сделать какие-то выводы о его энергоэффективности невозможно.

Формальный подход к проведению энергоаудита и составлению энергетических паспортов на основе только проектных данных, без выезда на объект выхолащивает саму идею экономии ресурсов. Россия столкнулась с этой проблемой в силу того, что в законодательных актах не была прописана система строгого контроля за результатами обследований и требования к квалификации специалистов, которые их проводят.

Качество диагностики в общем случае определяется следующими основными составляющими: изучением объекта контроля, процессов его функционирования; наличием современной приборно-аппаратной базы; применением корректных технологий инструментального контроля, обеспечивающих получение информационного параметра, по которому судят о качестве объекта и его энергоэффективности с заданной точностью; проведением работ квалифицированным персоналом, что позволяет использовать преимущества современных приборов, технологий контроля.

Основным методом неразрушающего контроля (НК) для инструментального энергоаудита является тепловой. Он позволяет выбрать оптимальные температурные нагрузки функционирования объектов, выявить и определить степень опасности дефектных узлов по признакам их перегрева по

отношению к качественным зонам, определить утечки тепла через ограждающие конструкции зданий и сооружений, оценить теплопотери через них и т.п.

Тепловой контроль (ТК) объектов проводится при эксплуатационных нагрузках, экологически безопасен, дает наглядные результаты и поэтому позволяет решать большое количество поставленных практикой задач в области технического диагностирования и оценки энергоэффективности конструкций. ТК основан на регистрации и анализе температурных (тепловых) полей контролируемых поверхностей, где информацию о параметрах объекта несет температура, значения которой в основном определяются изменением теплофизических, геометрических характеристик и параметров нагрузки.

Полученные в результате контроля матрицы температур сравнивают с эталонными для соответствующих участков, полученных экспериментально или расчетом, и по разности измеренных значений соответствующих элементов матриц (или одноименных координат) определяют дефектные области на поверхности контролируемого объекта.

Определение технического состояния и обнаружение дефектных участков объекта осуществляется путем сравнения значений эталонной температурной матрицы  $T_j(x, y)$  и реальных значений температуры контролируемой поверхности  $T_p(x_i, y_m, t_j)$  в моменты времени  $t_j$ :

$$F_j = \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^k (T_p(x_i, y_m) - T_j(x, y, t_j))^2 = \begin{cases} < \delta - \text{тех. состояние в норме,} \\ > \delta - \text{есть дефект.} \end{cases}$$

Здесь  $k, n$  – соответственно размер матрицы и максимальное количество элементов разложения кадра тепловизионного изображения;  $F_j$  – функционал невязки (квадрат величины среднеквадратичного отклонения);  $\delta$  – величина критерия качества.

ТК может применяться как первичный метод оценки технического состояния зданий и сооружений, технических устройств, дающий информацию о зонах температурных напряжений на поверхности функционирующего объекта, более подробный анализ которых в последующем может быть проведен другими методами НК.

В рамках энергетических обследований проводится контроль систем электроснабжения, тепло- и водоснабжения, водоотведения, вентиляции и кондиционирования воздуха, теплозащиты ограждающих конструкций. Это электро- и теплофи-

\* Статья на правах рекламы

кационное оборудование, дымовые трубы, трубопроводы и т.д.

ТК является основным инструментальным методом оценки текущего состояния объекта энергоаудита и на базе его результатов возможны рекомендации о теплотехнических характеристиках объектов.

На рис. 1 приведены отдельные термограммы офисного здания, дающие ясное представление о дефектах светопрозрачных конструкций и низкого сопротивления теплопередаче стен.

При проведении инструментального энергоаудита с применением теплового контроля необходимо решить следующие задачи:

1. Выбрать оптимальную аппаратуру контроля.
2. Разработать технологию обследования или использовать стандартную, если таковая имеется.
3. Убедиться, что контроль проводится квалифицированным персоналом.

В таблице рассмотрены основные типы современных тепловизоров по группам, в зависимости от их технических характеристик (рассмотрено свыше 110 модификаций). Наиболее востребованы переходные модели, которые отвечают минимальным требованиям к контролю как по техническим характеристикам, так и по стоимостным.

Зачастую из финансовых соображений энергоаудиторскими фирмами приобретаются тепловизоры самых низких характеристик (тип показывающие), которые не позволяют проводить корректный контроль крупногабаритных объектов, высотных зданий, дымовых труб, продуктопроводов, электрооборудования и т.п., что в конечном итоге сказывается на качестве и информативности отчетов, достоверности результатов и выводов.

Существующие технологии теплового контроля имеют большой резерв с точки зрения повышения достоверности, информативности, расширения области применения, в т.ч. за счет применения математического моделирования, оперативного уточнения и адаптации режимов контроля, совершенствования параметров аппаратных средств применительно к решаемым задачам контроля, совершенствования процесса организации контроля и т.п.

Что касается технологий проведения энергоаудита – разработка и реализация их в России

**Технические характеристики тепловизоров**

Характеристики \ Тип тепловизора	Показывающие	Переходные	Профессиональные	Высокого разрешения
Температурная чувствительность	0,1 °С	0,05 ÷ 0,1 °С	0,03 ÷ 0,08 °С	0,02 ÷ 0,08 °С
Пространственное разрешение	2,2 ÷ 3,5 мрад	1,1 ÷ 2,5 мрад	1,0 ÷ 1,3 мрад	0,6 ÷ 0,65 мрад
Размер матрицы приемника излучения	макс. 160×120 пикселей	320×240	320×240 384×288	640×480 и выше
Диапазон измеряемых температур	-20...+350°С	-20...+500 °С	-40...+500 °С	-40...+500 °С (до 2000 °С)
Масса	0,3... 0,8 кг	около 1 кг	1...2 кг	2...3 кг
Стоимость	До 300 тыс. руб.	300...800 тыс. руб.	800...1500 тыс. руб.	1300...2500 тыс. руб.

отдана в саморегулируемые организации (СРО). Но большинство из них не имеет в своем штате специалистов высшей квалификации по инструментальному контролю, которые могут разрабатывать методики, поэтому существует некоторый технологический «вакуум» в области энергетических обследований объектов.

Необходим новый подход к решению задач проведения энергоаудита, как технологической части, так и обучению и оценке квалификации специалистов.

Энергетическое обследование крупного промышленного предприятия – это серьезная исследовательская работа. Для того, чтобы заказчик аудита получил понятные и эффективные рекомендации, необходимо сопоставить экономическую выгоду от предлагаемых мероприятий и сумму затрат на проведение работ. В противном случае – энергоаудит становится просто формальной процедурой, стоящей, кстати, немалых денег.

Как показано на рис. 2, улучшение качества работ в области энергоаудита невозможно без наличия системы обучения и оценки квалификации специалистов, а также повышения уровня ответственности фирм, производящих эти услуги и компетентности надзорных органов, их признающие.

Спецификой ТК является то обстоятельство, что его объекты — действующее оборудование, находящееся под нагрузками, эксплуатирующиеся здания и сооружения. При этом обследуемую конструкцию нельзя принести в испытательную лабораторию, сложно, а зачастую и невозможно создать эталонные образцы с известными дефектами, диагностику нужно проводить в натуральных условиях, применять комплексные технологии контроля с использованием бесконтактных, контактных измерений и расчетных моделей теплопередачи для получения корректных результатов контроля. С учетом этих особенностей должен формироваться учебный курс по тепловому контролю для подготовки энергоаудиторов.

Слушателей таких курсов прежде всего интересуют вопросы технологии контроля различных объектов, получение информации о нормативно-правовой и методической базе его применения в рамках действующих законодательных актов, а

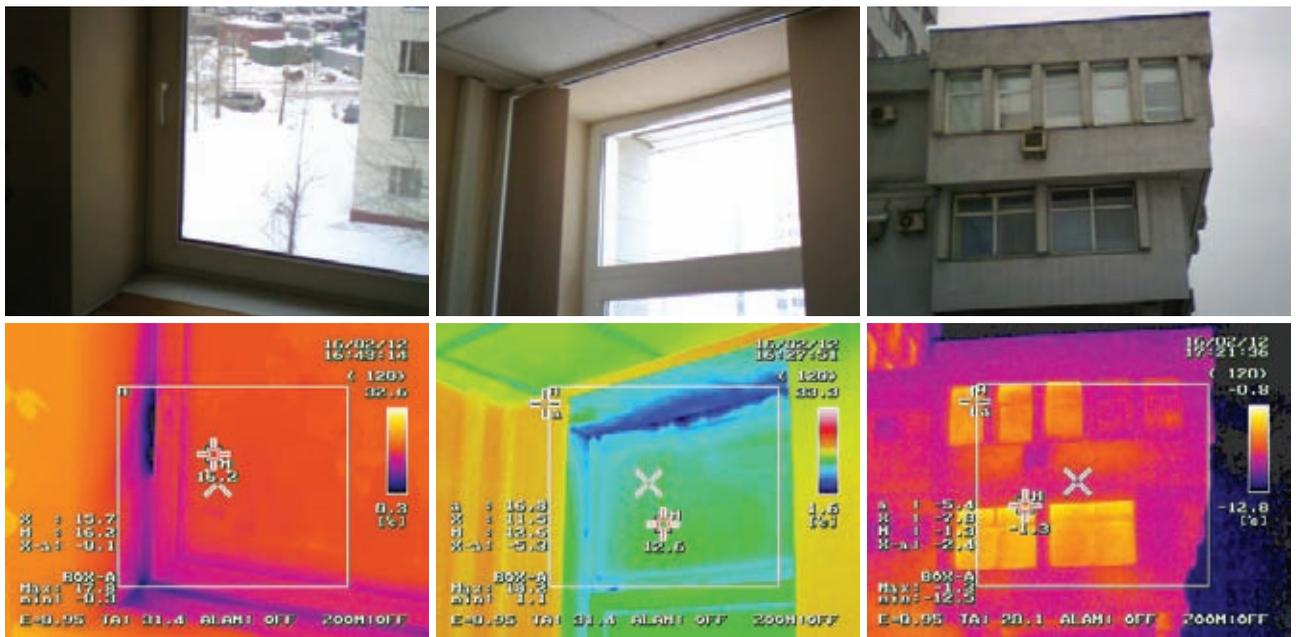


Рис. 1. Фотографии и термограммы офисного помещения: а, б – дефектные уплотнители светопрозрачных конструкций; в – под окнами повышенные температуры в области расположения отопительных приборов



Рис. 2. Сравнительная схема проведения энергоаудита и экспертизы промышленной безопасности промышленных объектов.

также критерии признания технической компетентности испытательных лабораторий.

В силу того, что в области ТК большинства объектов отсутствуют нормативные технологические документы по проведению контроля, оценке уровня дефектности, определению поро-

говых правил и выдаче заключений по результатам диагностики важное значение имеет разработка квалифицированными специалистами методической и нормативной документации по инструментальному энергоаудиту, которая требует своей реализации.

Абрамова Е. В., Быстрова Н. А., Будадин О. Н., Галкин Д. И., Франц Э. Б., Лизунов О. Н.

ФГАУ «НУЦ «Сварка и контроль»  
при МГТУ им. Н. Э. Баумана  
www.sertink.ru

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ»

25–26 ноября 2013 г. в Киеве в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины прошла представительная Международная конференция «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее», организованная Национальной академией наук Украины и Институтом электросварки. В ней приняли участие свыше 200 человек – представителей академических и отраслевых НИИ, научных, проектно-конструкторских и инженерных центров, промышленных предприятий и учебных университетов, руководители и менеджеры бизнес-структур и др. В числе участников конференции свыше 34 представителя из стран дальнего (Австрии, Болгарии, Великобритании, Германии, Индии, КНР, Польши, Словакии, США, Франции, Японии) и ближнего (Беларусь, Грузия, Казахстан, Россия) зарубежья.

Среди почетных гостей конференции были президент АН Республики Саха (Якутия), чл.-кор. РАН М. П. Лебедев, президент Российского научно-технического сварочного общества проф. О. И. Стеклов, президент сварочного общества Украины В. Г. Фартушный, президент общества сварщиков Беларуси проф. Л. С. Денисов.

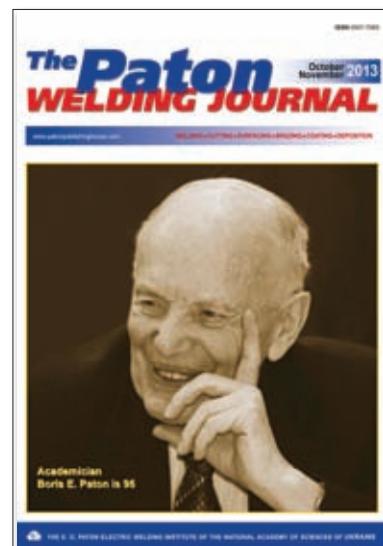
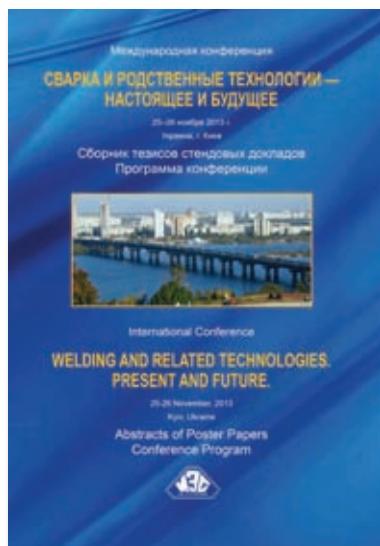
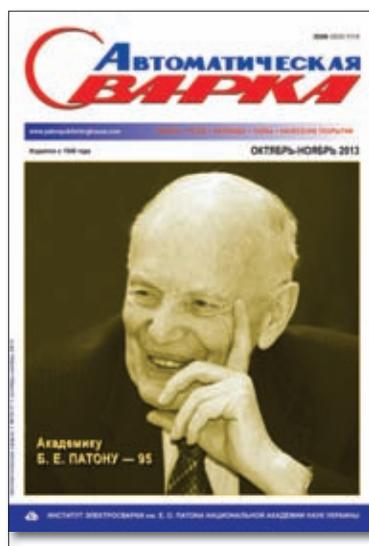
На конференции 25-го и в первой половине 26-го ноября были заслушаны и обсуждены на пленарных заседаниях 23 заказных доклада, представленных учеными из многих стран мира о последних наиболее важных научных достижениях в области сварки, наплавки, пайки, прочности, новых материалов, неразрушающего контроля и технической диагностики, оценки остаточного ресурса сварных конструкций,



Выступление зам. директора ИЭС им. Е. О. Патона академика НАНУ Л. М. Лобанова

инженерии поверхности, специальной электрометаллургии, а также перспектив развития этих направлений. Доклады вызвали большой интерес участников конференции и часто сопровождались вопросами к докладчикам.

К началу работы конференции пленарные доклады были изданы в виде отдельных выпусков журналов «Автоматическая сварка» и «The Paton Welding Journal» 10–11, 2013 г., а тезисы стендовых докладов в виде сборника. С содержанием журналов и сборника можно ознакомиться на сайте издательства ИЭС им. Е. О. Патона ([www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)).



Издания материалов конференции



Участники конференции

Ниже тезисно представлены пленарные доклады конференции.

**Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ для современной энергетики,** *Б. Е. Патон*, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (докладчик Л. М. Лобанов).

В докладе представлены разработки института для энергетики, в частности, технологии сварки крупногабаритных роторов турбин, электронно-лучевой сварки заготовок большой толщины из высокопрочных сталей, сварки под флюсом и контактной сварки пульсирующим оплавлением труб для магистральных газопроводов большого диаметра, технология и оборудование для создания энергосберегающих теплообменных устройств. Отмечены разработки, направленные на повышение коррозионной стойкости твэлов и безопасной эксплуатации АЭС. Представлены практические рекомендации по ремонту магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации, а также результаты исследований, показавшие возможность применения акустической эмиссии для мониторинга сварных конструкций, работающих при высоких температурах.

**Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего,** *Е. Н. Каблов, О. Г. Оснен-*

*никова, Б. С. Ломберг*, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», РФ.

В докладе определены стратегические направления развития материалов и технологий их переработки для основных деталей ГТД нового поколения на период до 2030 г. Изложены современные тенденции развития литейных и деформируемых жаропрочных сплавов, в том числе интерметаллидных на основе никеля и титана. Приведены характеристики установленного в «ВИАМ» нового вакуумного оборудования для выплавки жаропрочных сплавов и деформации высокотемпературных материалов в условиях изотермии на воздухе, а также результаты разработок в области ионно-плазменного нанесения защитных жаростойких, упрочняющих и теплозащитных покрытий на лопатки и другие детали ГТД и создания нового поколения плазмохимического оборудования. Разработана технология получения широкого спектра сверхчистых ультрадисперсных порошков методом атомизации для вакуумной диффузионной пайки и аддитивных технологий.

**Комплексное аддитивное производство на основе технологий сварки и соединений,** *Гуань Цяо*, Пекинский институт авиационных технологий, Китай.

Занимающий лидирующее положение в области научных исследований и технических раз-

работок в области нетрадиционных технологий сварки в Китае, Пекинский институт авиационных технологий (VAMTRI) участвует в ряде исследовательских программ, относящихся к комплексному аддитивному производству на основе технологий сварки и соединения. Эти исследовательские программы и проекты обеспечивают авиационной промышленности высокое быстродействие в отношении проектирования и опытного производства новой продукции.

Основанный в 1957 г., VAMTRI является комплексным исследовательским институтом, специализирующимся на научных исследованиях в области передовых авиационных промышленных технологий и разработке соответствующего оборудования, а также на внедрении их в промышленное производство. На основе новейших достижений института в сфере электроннолучевых, лазерных, плазменных и ионных технологий обработки, в 1993 г. в VAMTRI была создана Национальная ключевая лаборатория лучевых процессов.

Сварка, соединение и обработка силовыми пучками, а также сварка и соединение в твердой фазе – два основных направления научных исследований и технических разработок, проводимых в VAMTRI для решения «уникальных» и «критических» проблем современной авиационной промышленности, а также формирования технической основы для комплексного аддитивного производства, что способствует созданию перспективных технологий и соответствующего оборудования для авиационных предприятий Китая.

**Сварные или клеевые соединения — является ли это вопросом будущего?**, *Райсген У., Шлезер М.*, Институт сварки и соединений, Германия.

Современные легкие конструкции выполняются из самых различных материалов. Соединение этих материалов требует применения различных методов, в основном сварки и соединения склеиванием. В данной работе рассматриваются преимущества обоих методов, и описаны возможности совместного применения сварки и склеивания.

**Последние достижения в сварке трением с перемешиванием**, *Де<sup>1</sup> А., Диброй<sup>2</sup> Т.*, <sup>1</sup>Институт технологий Индии, <sup>2</sup>Университет Пенсильвании, США.

Сварка трением с перемешиванием – это относительно новый процесс сварки, в области которого продолжают комплексные исследования для улучшения его понимания. Процесс используется в промышленном масштабе для алюминия и других мягких сплавов. Однако его промышленное применение для сварки твердых сплавов требует разработки экономичного и долговечного инструмента. В данной работе рассмотрены последние

достижения в области численного моделирования теплообмена и текучести материалов, при этом основное внимание уделяется оптимизации размеров инструмента и выбору режимов сварки для обеспечения его максимальной долговечности.

**Инновационные технологии в области конструкционных сталей и их сварки**, *И. В. Горынин*, ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». РФ.

Рассмотрена ретроспектива сотрудничества ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» с ИЭС им. Е. О. Патона в области создания особо надежных металлических материалов и промышленных технологий для специальной техники, разработки покрытых электродов, агломерированных флюсов, порошковых проволок, сварочных технологий и оборудования. Отмечен единый подход к разработкам технологии металлургии и сварки с конечной целью обеспечения высокой эксплуатационной надежности создаваемых на основе новых материалов для современных конструкций. Перечислены совместные работы по оценке сопротивления материалов хрупким разрушениям, развитию методов оценки циклического ресурса сварных конструкций, совершенствованию методик сертификационных испытаний металла.

**Сварка сегодня и завтра**, *Пилярчик Я., Зе-ман В.*, Институт сварки, Гливице, Польша.

Описаны изменения в польском сварочном производстве, которые произошли в течение последних 20 лет: в области прав собственности производителей сварочного оборудования и материалов, инвестиций, влияния свободного рынка, важности знаний и увеличения собственных потенциальных возможностей людей. Эти факторы позволили приблизить уровень развития сварочного производства в Польше к мировому уровню.

**Привлечение и подготовка руководящего персонала в области сварки и пайки**, *Коул Н., Вебер Дж., Пфарр М., Хернандес Д.*, Американское сварочное общество, США.

Нехватка сварщиков и специалистов в области сварки ощущается в глобальном масштабе, и эта проблема усугубляется по мере того, как из профессии уходят квалифицированные и образованные работники. Для решения этой проблемы во многих странах активно разрабатываются программы по улучшению имиджа сварки, а также по подготовке и обучению персонала. Виртуальная сварка с использованием компьютерного моделирования является одним из методов ознакомления молодежи со сваркой и стимулирования интереса молодых людей к сварке. Некоторые компании используют виртуальных сварщиков или сварочные тренажеры для тестирования или даже



базовой подготовки новых работников. Женщины составляют 50 % населения, и, тем не менее, очень немногие из них выбирают сварку. У нас есть хорошие модели для подражания по многим направлениям сварки, которые представлены в данной работе. Если человек интересуется сваркой, его необходимо соответствующим образом подготовить и обучить. Weld-Ed – это программа, используемая в США. Она включает:

1) модельный курс обучения на 2 года для колледжей;

2) программу для усовершенствования квалификации инструкторов;

3) метод, направленный на создание сотрудничества между промышленностью и школами и колледжами, предлагающими необходимую квалификацию и знание имеющихся специальностей.

Новая технология используется в нескольких странах по-разному для улучшения подготовки и образования. В докладе представлены несколько видов технологии, включая обучение в режиме онлайн, а также с применением электронных устройств. Подтверждением полученных профессиональных навыков является усвоение Программы сертификации. Сварочная наука и технология нуждаются в подающих надежды молодых людях для решения национальных и глобальных проблем. От них зависит наше будущее, конструкции и инфраструктура.

**Основы технологии электроконтактного спекания наноструктурированных металлополимерных покрытий триботехнического назначения, Ю. М. Плескачевский<sup>1</sup>, В. А. Ковтун<sup>2</sup>,**  
<sup>1</sup> Гомельский филиал НАН Беларуси, <sup>2</sup> Гомельский инженерный ин-т Мин-ва по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Представлены модельно-теоретические подходы к оптимизации структурно-технологических условий электроконтактного спекания металлополимерных покрытий.

Показано, что применение методов компьютерного моделирования зон формирования порошковых композиционных материалов на принципах мезомеханического подхода с использованием структурных моделей, адаптированных к широкому диапазону значений технологических параметров и свойствам исходных компонентов порошковой системы, позволяет устанавливать закономерности влияния технологических факторов и структурных особенностей, а также характеристик исходных компонентов дисперсных порошковых систем на процессы структурообразования спеченных слоев. При этом определяющее значение имеет учет локального воздействия тепловых факто-

ров и внутренних напряжений, возникающих в процессе формирования покрытий.

**Неразрушающий контроль конструкционной целостности элементов резервуара, Димлай<sup>1</sup> В., Мудж<sup>1</sup> П., Джексон<sup>2</sup> П., Там-Хин Ган<sup>1</sup>, Суа<sup>1</sup> С.,**  
<sup>1</sup> Британский институт сварки, <sup>2</sup> Plant Integrity Ltd., Великобритания.

Большие наземные резервуары, заполненные углеводородами и другими жидкостями и химикатами, широко используются в Великобритании, Европе и во всем мире. Резервуарные парки обычно расположены в прибрежных районах вблизи крупных населенных центров. Утечка из резервуаров, в частности, в результате разрушения коррозией их донной части, является серьезной экологической и экономической проблемой и представляет собой значительную угрозу для людей, живущих вблизи резервуарных парков. Имеющийся и растущий риск разрушения резервуаров вместе с потенциальным риском пожара и взрыва на расположенных вблизи нефтехимических предприятиях абсолютно недопустим.

В докладе рассмотрены работы, проводимые в рамках проекта контроля целостности резервуаров при Комитете технологической стратегии Великобритании (ТИМ) по контролю конструкционной целостности днищ крупных наземных резервуаров для хранения жидкостей, не требующему доступа к внутренней части резервуара или его освобождению от содержимого, с использованием ультразвуковых направленных волн (UGW) в качестве метода неразрушающего контроля. Разработана система контроля конструкционной целостности для накопления данных по ультразвуковым направленным волнам в течение длительного периода времени.

Исследовали характеристики постоянных прикрепляемых датчиков и системы контроля конструкционной целостности, чтобы продемонстрировать их надежность. Распространение направляемых волновых сигналов проверено экспериментально на днище резервуара диаметром 4 м, для обнаружения и определения расположения дефектов разработана система формирования томографических изображений.

**Расчетное моделирование и экспериментальные исследования процессов переплава, Жарди А.,** Институт Жана Ламура, Франция.

Численное моделирование процессов переплава позволяет объединить локальные условия кристаллизации и рабочие параметры процесса. Рассмотрены последние исследования, направленные на разработку отдельных аспектов, например, распределение переменного тока при ЭШП сталей и сверхпрочных сплавов, совокупное движение дуги в печи ВДП и влияние электромагнитного

перемешивания на макросегрегацию в переплавленных слитках.

**Тенденции развития сварки в Австрии**, Энзингер Н., *Соммитч К.*, Институт исследования материалов и сварки, Австрия.

Фирмы и научно-исследовательские институты Австрии сотрудничают в области финансируемых научных проектов в рамках австрийской системы перспективных проектов COMET K-project JOIN4+. Проект JOIN4+ имеет бюджет 6,6 миллионов Евро. Денежное покрытие обеспечивается всеми научными партнерами, австрийским правительством и соответствующими провинциями. В настоящее время рассматривается восемь различных проектов в двух областях. В докладе описана ситуация с финансированием и представлены некоторые результаты.

**Перспективные технологии создания высоконадежных изделий из конструкционных сталей для базовых отраслей промышленности**, А. В. Дуб, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», РФ.

Рассмотрены основные элементы новых комплексных технологий, обеспечивающих эффективное получение материалов с новым уровнем свойств. Отмечена перспективность создания новых систем легирования конструкционных материалов для машиностроения с управлением их первичной кристаллической структурой, механизмами упрочнения, сопротивления хрупким разрушениям.

**Микросварка алюминиевых сплавов пульсирующим лазером Nd:YAG и непрерывным диодным лазером**, *Окамото<sup>1</sup> Я., Накашиба<sup>2</sup> С., Сакагава<sup>2</sup> Т., Окада<sup>1</sup> А.* <sup>1</sup>Высшая школа естественных наук и технологий университета Окаямы, Япония; <sup>2</sup>Лаборатория исследования лазерных технологий Корпорации Катаока, Япония.

Сочетание импульсного Nd:YAG лазера с диодным лазером, генерирующим в непрерывном режиме, может обеспечить высококачественную микросварку алюминиевого сплава. Излучение импульсного Nd:YAG лазера эффективно поглощается с самого начала лазерного сканирования посредством предварительного нагрева импульса Nd:YAG лазера с наложением непрерывного диодного лазера. При этом можно получить широкий и глубокий валик шва, отличающийся улучшенной целостностью поверхности.

**Анализ и выбор сварочных технологий при строительстве магистральных трубопроводов большого диаметра**, М. Белоев<sup>1</sup>, В. И. Хоменко<sup>2</sup>, С. И. Кучук-Яценко<sup>3</sup>, <sup>1</sup>KZU Holding Group. Болгария, <sup>2</sup>ЗАО «Псковэлектросвар». РФ, <sup>3</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Рассмотрены достоинства и недостатки различных технологий соединения труб, применяемых при строительстве магистральных трубопроводов. Отмечены преимущества контактной сварки оплавлением по сравнению с дуговым, лучевым и гибридным способами сварки.

**Регулирование остаточных сварочных напряжений: измерения, анализ усталости, упрочняющие обработки**, *Кудрявцев Ю., Клейман Я.*, Structural Integrity Technologies Inc., Канада.

Регулирование остаточных напряжений выражается концепцией, согласно которой для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик сварных конструкций экспериментально или теоретически рассматриваются и оцениваются три основных этапа процесса: определение остаточных напряжений, анализ усталости при наличии остаточных напряжений и благоприятное распределение остаточных напряжений.

В работе рассмотрены все три этапа, а также ряд новых инженерных инструментов, таких как ультразвуковой компьютеризированный комплекс для измерения остаточных напряжений UltraMARS, программное обеспечение для анализа влияния остаточных напряжений на усталостную прочность сварных элементов ReSIST, новая технология, а также на ее основе компактная система для благоприятного распределения остаточных напряжений, обеспечиваемого ультразвуковой ударной обработкой UltraPeen.

Приведены примеры промышленного применения разработанных инженерных инструментов для анализа остаточных напряжений и повышения усталостной прочности сварных элементов.

**Сварка, резка и термическая обработка живых тканей**, *Б. Е. Патон, И. В. Кривцун, Г. С. Маринский, И. Ю. Худецкий, Ю. Н. Ланкин, А. В. Чернец*, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Представлены результаты исследований и разработок ИЭС им. Е. О. Патона в области высокочастотной сварки и родственных технологий для соединения, коагуляции, резки и термической обработки живых тканей, а также рассмотрены вопросы создания специализированного оборудования и инструментов для реализации указанных процессов.

Описан опыт применения разработанных технологий и оборудования в практической хирургии, свидетельствующий об их высокой востребованности – на сегодня освоено более 150 различных хирургических методик и успешно выполнено свыше 100 тыс. хирургических операций в самых разных областях хирургии.

Представлены данные исследований особенностей реструктуризации живых тканей и обра-



зования сварного соединения при воздействии проходящего через них высокочастотного тока. На основе полученных экспериментальных и клинических данных продемонстрирована возможность ткани, подвергнутой действию высокочастотной сварки, поддерживать свою жизнеспособность, восстанавливать физиологические свойства и функции за счет процессов регенерации.

Представлены материалы исследований процесса высокочастотной сварки мягких биологических тканей с автоматическим регулированием, обеспечивающим гарантированное получение сварного соединения в широком диапазоне свойств свариваемой ткани. Рассмотрены перспективы дальнейшего развития технологий и оборудования для высокочастотной сварки и термической обработки живых тканей как за счет дальнейшего расширения хирургических сфер использования, так и за счет создания новых многофункциональных аппаратов, сочетающих процессы высокочастотной сварки и конвекционно-инфракрасной обработки живых тканей, в том числе автономных мобильных аппаратов.

На конференции были также представлены пленарные доклады, которые не вошли в сборник трудов конференции.

– «Компьютеризированные технологии и их влияние в обучении сварке», *С. Кайтель, С. Арнс, Г. Молл*, Учебный центр, Галле, Германия;

– «Микро-, макро-, и мегамасштабный структурный анализ сварных компонентов с помощью цифрового моделирования и их экспериментальной проверки в Японии», *М. Мочизуки*, Университет Осаки, Япония;

– «Дуговая сварка в среде защитных газов легких алюминиевых конструкций», *Р. Винклер*, Институт сварки и соединений, Германия; «Применение энергии взрыва в сварке, родственных

процессах и технологиях», *В. И. Лысак*, Волгоградский гос. тех. ун-т, РФ;

– «Перспективы разработки и практического применения импульсных технологий сварки и наплавки для повышения эксплуатационной надежности металлоконструкций ответственного назначения, предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера и Арктики», *Ю. Н. Сараев<sup>1</sup>, В. А. Лебедев<sup>2</sup>, С. Ю. Максимов<sup>2</sup>*, <sup>1</sup>Юргинский технический университет, РФ, <sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины;

– «Производство разнородных соединений сплавов магния со сталью и алюминием», *Х. Ала-лус*, Инновационный центр Штайнбайса, Германия.

Во второй половине дня 26 ноября в читальном зале Института электросварки были представлены для ознакомления 185 стендовых докладов. Экспозиция включала следующие разделы:

– технологии, материалы и оборудование для сварки и родственных технологий (76 докладов);

– прочность сварных соединений и конструкций, теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированных состояний и их регулирования (44 доклада);

– неразрушающий контроль и техническая диагностика (16 докладов);

– инженерия поверхности (36 докладов);

– специальная электрометаллургия (13 докладов);

– проблемы сварки в медицине, экология, аттестация и стандартизация сварочного производства (10 докладов).

В период работы конференции состоялся ряд двухсторонних переговоров, направленных на кооперацию и укрепление сотрудничества, подписано Соглашение о сотрудничестве между Обществом сварщиков Украины и Российским научно-техническим сварочным обществом.

*А. Т. Зельниченко, В. Н. Липодаев*  
Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАНУ

## Международная конференция «Неразрушающий контроль 2014»

13-15 мая, Киев, Пуца-Водица

Конференция приурочена к 10-летию «УкрНИИНК»

Организатор — Ассоциация «ОКО» при поддержке и участии «Ультракон-Сервис», «Промприлад», «УкрНИИНК», Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики, Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, НАЭК «Энергоатом», Укрзалізниця, АНТК им. Антонова и других организаций.

В программе конференции планируется заседание секций:

- Неразрушающий контроль как важный элемент обеспечения безопасности на железных дорогах
- Автоматизированный контроль в различных отраслях промышленности
- Неразрушающие методы контроля в авиастроении и техническом обслуживании
- Новейшие технологии неразрушающего контроля, применяемые в области энергетики

Тел./факс: (044) 531-37-27, 531-37-26; e-mail: [ndt2014@gmail.com](mailto:ndt2014@gmail.com), [www.ndt.com.ua](http://www.ndt.com.ua)

## КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ ПО НК В 2014 г.

Дата	Место проведения	Мероприятие
18–20 февраля	Москва/Россия	13-я Международная выставка «Не разрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»
24–28 февраля	Свалява, Карпаты/Украина	Международный научно-технический семинар «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте»
03–06 марта	Москва/Россия	20-я Всероссийская Научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике
09–13 марта	Сан Антонио/США	Международная конференция и выставка «Corrosion-2014»
01–03 апреля	Киев/Украина	Международная специализированная выставка «Киевская техническая ярмарка»
13–15 мая	Киев/Украина	Международная конференция-выставка «Не разрушающий контроль 2014»
06–10 июня	Прага/Чехия	11-я Европейская конференция по неразрушающему контролю ECNDT 2014
11–13 июня	Львов/Украина	Международная конференция «Коррозия-2014»
22–26 сентября	Ялта/Украина	Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях»
29 сентября–03 октября	Ялта/Украина	Международная научно-практическая конференция «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»
Конец сентября – начало октября	Киев/Украина	Научная конференция «80 лет ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины»
29 сентября–03 октября	Брно/Чехия	Международная машиностроительная выставка MSV-2014
07–10 октября	Москва/Россия	14-я Международная выставка сварочных материалов, оборудования и технологий
Ноябрь	Киев/Украина	Международный промышленный форум с разделом «Укр-сварка»
25–27 ноября	Екатеринбург/Россия	Выставка «Сварка. Контроль и диагностика»

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



Подписка на электронную версию журнала  
**«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»**  
на сайте: [www.patonpublishinghouse.com](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 2014 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2012 гг.

Подписано к печати 30.01.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать.

Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклейки.

Печать ООО «Фирма «Эссе».

03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.