

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 4, 2011

Издается с января 1989 г.

Учредители: Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О.Патона
Международная ассоциация «Сварка»

Издатель: Международная ассоциация
«Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
Н. П. Алешин, В. Л. Венгринович,
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,
В. В. Ключев, А. А. Лебедев,
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,
Г. И. Прокопенко, В. А. Стороженко,
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11
Институт электросварки
им.Е.О.Патона НАН Украины
Тел.: (044) 205-23-90
Факс: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор

Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середя

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней.
При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- НЕДОСЕКА А.Я., НЕДОСЕКА С.А., ЯРЕМЕНКО М.А.**
Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и
газокомпрессорных станций методом акустической эмиссии 3
- ЛОБАНОВ Л.М., НЕХОТЯЩИЙ В.А., РАБКИНА М.Д.,
КОСТИН В.А., ХАРЧЕНКО В.В., КОНДРЯКОВ Е.А., УСОВ В.В.,
ШКАТУЛЯК Н.М.** Влияние пластической деформации на струк-
туру, механические свойства и коэрцитивную силу металла
кислородных баллонов..... 14
- ФОМИЧОВ С.К., ЧВЕРТКО Е.П., СКАЧКОВ И.О.,
СХАБОВСЬКИЙ Я.В., ЧВЕРТКО П.М.** Прогнозування типів
дефектів при стиковому зварюванні оплавленням стержневої
арматури залізобетону 24
- ДУБОВ А.А.** Контроль качества сварных соединений с исполь-
зованием магнитной памяти металла 28
- ПУХЛИЙ В.А.** Ресурс оборудования реакторов АЭС при
воздействии высокотемпературных и радиационных полей 33
- КАРПАШ М.О.** Підвищення чутливості акустичного методу
неруйнівного контролю матеріалів 39
- ДЯДИН В.П.** Особенности испытания ударных образцов
Менаже и Шарпи при хрупком разрушении 44

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- НАЙДА В.Л., ОЛЕЙНИК Ю.А., ГОГУЛЯ А.Н., ИГНАТЕНКО В.А.**
Обеспечение эффективности автоматизированного ультра-
звукового контроля металлургической продукции и перспек-
тивы его развития 48
- ЗАВАЛЬНЮК О.П., НЕСТЕРЕНКО В.Б.** Мониторинг
прочности судна как один из путей обеспечения
безопасности мореплавания..... 53
- ЕГУРЦОВ С.А., ПИКСАЙКИН Р.В.** Диагностика запорно-
регулирующей арматуры на герметичность 57

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- Первое заседание совета Китайско-украинского института
сварки им. Е.О.Патона..... 59
- 19-я Международная конференция «Современные методы и
средства неразрушающего контроля и технической диагностики»..... 60
- К 100-летию со дня рождения А.А. Казимилова 63

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 4, 2011

Founded in January, 1989

Founders: The National Academy of Sciences of Ukraine
The E. O. Paton Electric Welding Institute
International Association «Welding»

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
N. P. Aleshin, V. L. Vengrinovich,
E. F. Garf, A. A. Gruzd,
E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko,
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chaousov,
E. V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

Address

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str.,
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 200-23-90,
Fax: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors

T. V. Ushtina

Electron galley

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

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

This publication and each of
the articles contained here in are
protected by copyright. Permission to
reproduce material contained in this
journal must be obtained in writing
from the Publisher.

CONTENTS

SCIENTIFIC-TECHNICAL

- NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., YAREMENKO M. A.*
Continuous monitoring of the main gas pipelines and gas
compressor units by acoustic emission method..... 3
- LOBANOV L. M., NEKHOTYASHCHII V. A., RABKINA M. D.,
KOSTIN V. A., KARCHENKO V. V., KONDRYAKOV E. A., USOV
V. V., SHKATULYAK N. M.* Influence of plastic deformation on the
structure, mechanical properties and coercive force of metal of
oxygen bottles..... 14
- FOMICHOV S. K., CHVERTKO E. P., SKACHKOV I. O.,
SKHABOVSKII Ya. V., CHVERTKO P. M.* Prediction of defect types
at flash-butt welding of concrete reinforcement bars 24
- DUBOV A. A.* Control of welded joint quality using magnetic
memory of metal 28
- PUKHLII V. A.* Residual life of NPP reactor equipment exposed to
high-temperature and radiation fields 33
- KARPASH M. O.* Increase of sensitivity of acoustic technique of
NDT of materials..... 39
- DYADIN V. P.* Peculiarities of testing Mesnager and Charpy impact
samples at brittle fracture 44

INDUSTRIAL

- NAIDA V. L., OLEINIK Yu. A., GOGULYA A. N.,
IGNATENKO V. A.* Ensuring the effectiveness of automatic ultra-
sonic testing of metallurgical products and prospects
for its development 48
- ZAVALNYUK O. P., NESTERENKO V. B.* Monitoring ship strength
as one of the methods to improve navigation safety..... 53
- EGURTSOV S. A., PIKSAIKIN R. V.* Diagnostics of stop-valves for
leakproofness 57

NEWS AND INFORMATION

- First meeting of the Chinese-Ukrainian E.O. Paton Electric
Welding Institute 59
- 19th International Conference «Modern Methods and Means of
NDT and Technical Diagnostics» 60
- For 100th birth anniversary of A. A. Kazimirov 63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics



НЕПРЕРЫВНЫЙ МОНИТОРИНГ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ И ГАЗОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Я. НЕДОСЕКА, **С. А. НЕДОСЕКА**, д-ра техн. наук, **М. А. ЯРЕМЕНКО**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены вопросы оснащения объектов газотранспортной отрасли системами непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга, конструктивные и эксплуатационные особенности магистральных газопроводов и газокomppressorных станций, обоснована необходимость организации их непрерывного мониторинга. Обоснованы основные преимущества метода АЭ перед другими неразрушающими методами при проведении различных типов контроля промышленных конструкций. Проанализированы альтернативные решения по НК газопроводов и газокomppressorных станций. Показано, что в настоящий момент имеются все необходимые аппаратные, программные и организационные средства для оснащения объектов газотранспортной отрасли системами непрерывного АЭ мониторинга, а их использование является источником обеспечения безопасной эксплуатации и повышения рентабельности.

The questions of fitting the facilities of gas transportation industry by systems of continuous acoustic-emission monitoring, design and service features of the main gas pipelines and gas compressor units are considered, and the need to organize their continuous monitoring is substantiated. The main advantages of acoustic emission method over other NDT techniques at application of various kinds of monitoring of industrial constructions are substantiated. Available alternative solutions on NDT of gas pipelines and gas compressor units are analyzed. It is shown that at present all the required hardware, program and organizational means are available for fitting the facilities of gas transportation industry by systems of continuous AE monitoring, and their application is a source of ensuring safe service and increasing the profitability.

Магистральные газопроводы и оборудование газокomppressorных станций являются промышленными объектами повышенной опасности, поскольку постоянно присутствует два основных компонента, создающих возможность аварии — работа под давлением и взрывопожароопасная рабочая среда. В процессе эксплуатации металл, из которого изготовлены трубы газопроводов, накапливает различные повреждения, которые вызваны, в частности, нарушением эксплуатационных режимов, изменяющимися нагрузками, коррозионными процессами, химическим воздействием транспортируемого газа на стенки труб [1, 2]. Следует отметить, что, как правило, прямой зависимости между сроком эксплуатации трубопровода и степенью его поврежденности не существует. Весьма трудно также разделить поврежденность, вызванную действием каждого из определяющих факторов. В связи с этим наиболее перспективной представляется интегральная оценка поврежденности материала, без детализации факторов, вызвавших повреждения.

Независимо от причин возникновения аварий, их последствия могут быть весьма серьезными, даже если речь идет не о магистральных газопроводах, а о небольших компрессорных станциях. Например, в России 10 февраля 2008 г. произошла авария на компрессорной станции (КС) компании «Томскнефтехим» из-за разгерметизации оборудования. Один человек погиб, два пострадали. 25 января 2011

г. в поселке Онохой Заиграевского района произошел взрыв на компрессорной автомобильной газозаправочной станции. После взрыва газа начался пожар на площади 150 м². В результате произошло обрушение здания, один человек погиб, есть раненые.

Последствия при авариях на магистральных газопроводах, как правило, значительно масштабнее. Например, 7 мая 2007 г. в Таращанском р-не Киевской обл. на газопроводе Уренгой–Помары–Ужгород произошел взрыв возле КС Ставище (рис. 1). Газ подавался под давлением 74 атм. Взрывной волной 30-метровый кусок трубы диаметром 1420 мм отбросило на 150 м, на месте взрыва возник пожар. На площади 1,5 га выгорели зеленые насаждения, остались без газоснабжения 22 населенных пункта в Таращанском районе, включая сам райцентр, четыре населенных пункта в Богуславском р-не и шесть в Черкасской обл. Транспортировка природного газа из России в Европу по магистральному газопроводу была приостановлена.

Аварии и неполадки в работе компрессорного оборудования [3] происходят вследствие конструктивных недостатков отдельных деталей и узлов, ошибок, допущенных при изготовлении, и несоблюдения требований инструкций и норм эксплуатации. В процентном отношении общее количество аварий и неполадок компрессорных машин (по данным, полученным ВНИИ «Компрессормаш» на одном из химических комбинатов) распределялось следующим образом: 6 % аварий



из-за конструктивных недостатков; 54 % аварий из-за низкого качества деталей (причем на вновь изготавливаемые детали пришлось 46 %, а на ремонтируемые — 8 %), 40 % аварий из-за нарушения инструкций и норм эксплуатации.

Приведем для полноты понимания проблемы некоторые сведения о КС — по данным специализированных источников, прежде всего РГУ нефти и газа им. Е. М. Губкина [4, 5]. Большинство месторождений газа расположено на удалении от крупных его потребителей. Подача газа к ним осуществляется по магистральным газопроводам различной протяженности и диаметра. Для поддержания заданного расхода транспортируемого газа и обеспечения оптимального давления в трубе по трассе газопровода устанавливаются КС. Современная КС — сложное инженерное сооружение, обеспечивающее основные технологические процессы по подготовке и транспорту природного газа. КС служит управляющим элементом, параметры работы которого определяют режим работы газопровода, и который регулирует режим работы газопровода при колебаниях потребления газа.

Головные компрессорные станции (ГКС), устанавливаемые непосредственно возле газового месторождения, предназначены для поддержания необходимого давления технологического газа при его дальнейшей транспортировке по магистральному газопроводу. Характерными особенностями ГКС являются высокая степень сжатия газа, обеспечиваемая последовательной работой нескольких газоперекачивающих агрегатов (ГПА), и повышенные требования к качеству подготовки технологического газа — очистке от механических примесей, осушке от газового конденсата и влаги, а также удалению (при наличии) побочных продуктов: сероводорода, уголекислоты и т.д.

Линейные КС устанавливаются на магистральных газопроводах, как правило, через 100...150 км. Назначением КС является компримирование поступающего на станцию природного газа с давления входа до давления выхода, обусловленных проектными данными, для обеспечения постоянного и заданного расхода газа по магистральному газопроводу. Крупные магистральные газопроводы обычно проектируют в расчете на давления 5,5...7,5 МПа.

Дожимные компрессорные станции (ДКС) устанавливаются на подземных хранилищах газа (ПХГ) и служат для подачи газа в подземное хранилище из магистрального газопровода, для отбора газа из хранилища с последующей подачей его в магистральный газопровод или непосредственно потребителям газа. ДКС строятся также и на газовом месторождении при падении пластового давления ниже давления в магистральном трубопроводе. Отличительной особенностью ДКС

от линейных КС является более высокая степень сжатия, улучшенная подготовка технологического газа (осушители, сепараторы, пылеуловители), поступающего из подземного хранилища, с целью его очистки от механических примесей и влаги, вносимой с газом.

Вид основного газоперекачивающего оборудования КС определяется пропускной способностью газопровода. Для газопроводов с пропускной способностью менее 12 млн м³/сут на КС обычно используют поршневые компрессоры, с меньшей пропускной способностью — центробежные нагнетатели с приводом от газотурбинных установок или электродвигателей. Технологическую схему КС и необходимое вспомогательное оборудование выбирают в зависимости от типа устанавливаемых ГПА.

Учитывая конструктивную сложность КС, большое количество агрегатов и протяженность труб обвязки, наиболее надежным средством обеспечения их безопасной эксплуатации представляется непрерывный акустико-эмиссионный (АЭ) мониторинг [6, 7].

Метод АЭ. Метод АЭ [8, 9] основан на том, что в процессе деформирования в местах нагруженных конструкций, где зарождается и происходит разрушение, возникают акустические волны, которые затем распространяются по материалу и могут быть зарегистрированы специальными датчиками. Обработка и анализ этой информации позволяют определять координаты дефектов и задолго до разрушения судить об их опасности. Основной принцип работы АЭ аппаратуры следующий: волна, излученная развивающимся дефектом, выходит на поверхность контролируемого объекта и воздействует на контактные участки акустических датчиков (рис. 2), которые преобразуют полученные звуковые колебания в электрический сигнал и передают его АЭ прибору для обработки (усиление, фильтрация, оцифровка и т. д.) и последующего анализа. Диагностика реальных объектов включает вначале обнаружение, а затем идентификацию источника АЭ и его оценку.

Особенностью метода является возможность контролировать состояние материала на больших расстояниях от мест размещения датчиков, выполнять малым числом датчиков контроль крупных промышленных объектов, в том числе сложной конфигурации и на участках, доступ к которым затруднен (подземных, покрытых изоляцией). Метод имеет целый ряд преимуществ перед другими средствами НК (таблица).

Следует обратить внимание на то, что от способа выполнения АЭ контроля существенно зависит безопасность дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта. К таким способам можно отнести следующие.

Газовый контроль. Как правило, проводится в процессе плановых механических испытаний

объекта (для конструкций, работающих под давлением это чаще всего гидро- или пневмоиспытания). Объект нагружают от нулевой или минимальной нагрузки до величины, которая несколько превышает рабочее значение (величина перегрузки регламентируется государственной или отраслевой нормативной документацией и для сосудов давления составляет 1,25). Если в процессе испытания обнаружены источники повышенной АЭ активности, проводят анализ их опасности для данного объекта и по его результатам дают заключение о возможности дальнейшей его эксплуатации и рекомендуемых эксплуатационных параметрах. Преимуществом данного подхода является сравнительно низкая стоимость проведения контроля. Сама процедура контроля занимает мало времени, не требует стационарной установки



Рис. 1. Последствия взрыва на газопроводе вблизи КС Ставище

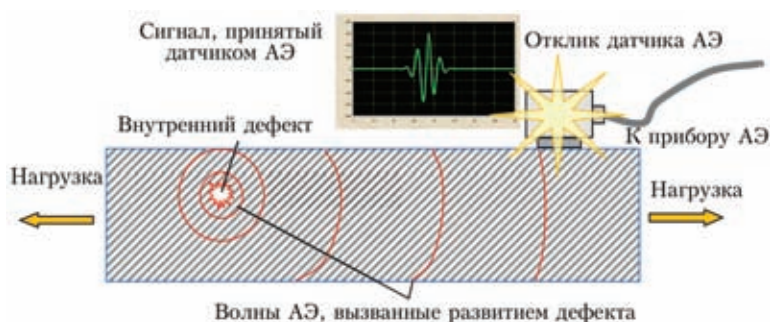


Рис. 2. Схема работы метода АЭ



Рис. 3. Системы непрерывного АЭ мониторинга хранилищ жидкого аммиака и мостовой переход аммиакопровода через р. Днепр: а — хранилище аммиака ОПЗ; б — аммиакопровод на мосту через р. Днепр; в — измерительный блок системы АЭ мониторинга в период монтажа; г — система АЭ мониторинга после герметизации в специальных взрывопожаробезопасных контейнерах с климатконтролем

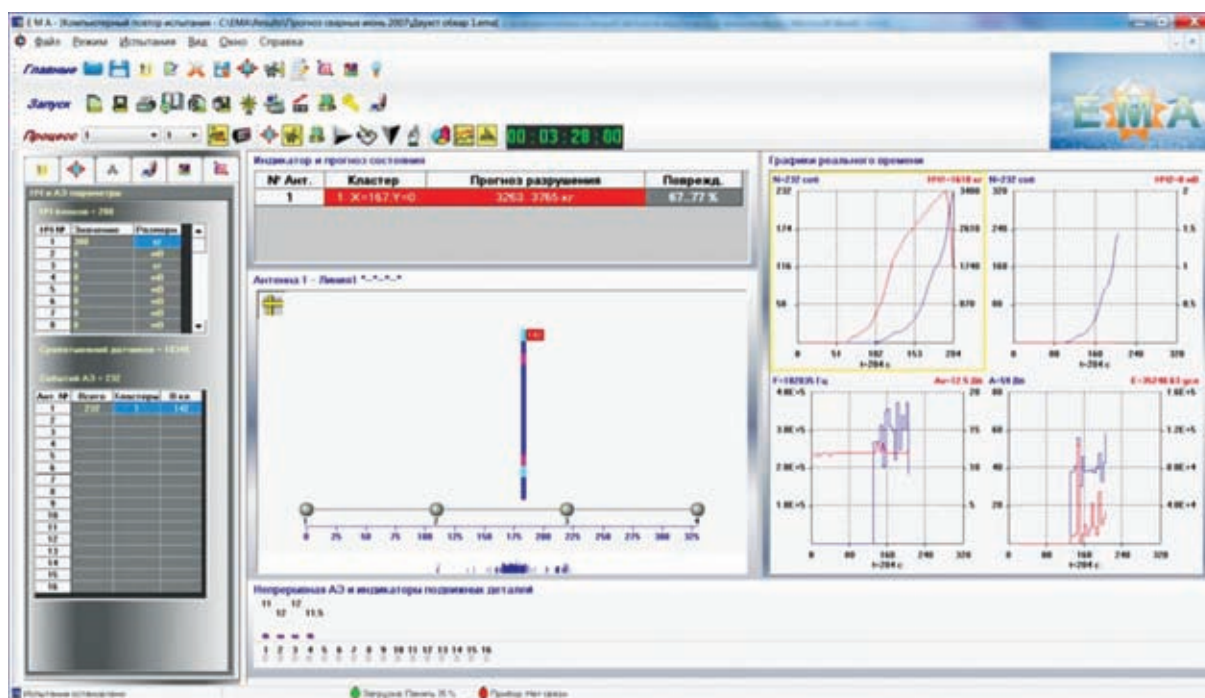


Рис. 4. Окно программы ЕМА-3.9. Определение координат событий АЭ, кластеризация и прогнозирование разрушения. Во время испытаний система показывает наиболее опасное место, где формируется разрушение, на схеме объекта контроля и осуществляет привязку результатов прогноза к этому объекту

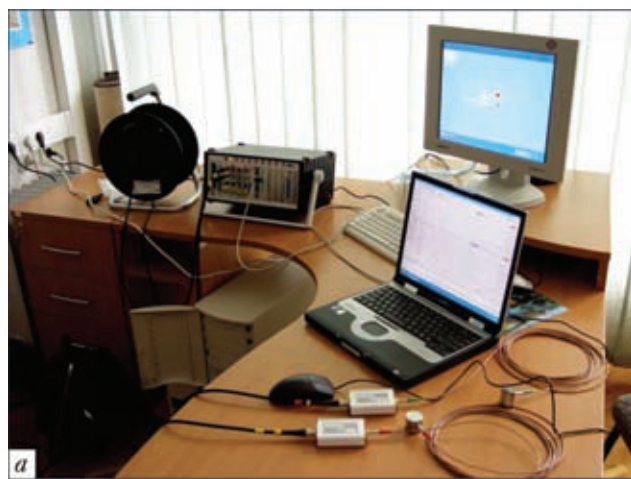


Рис. 5. 16-канальные мобильные системы АЭ контроля ЕМА-3 (а) и СДАЭ-16 (б)

датчиков и аппаратуры и может быть выполнена с использованием мобильных АЭ систем. Недостатками же является то, что, во-первых, при испытании требуется создание избыточной нагрузки, повышающей риск развития дефектов, во-вторых, после проведения испытания объект не контролируется. Возникновение развивающихся дефектов уже после проведения разового контроля может привести к опасной ситуации.

Периодический контроль. Процедура проведения аналогична разовому контролю, но повторяется с определенным интервалом. Интервал в зависимости от объекта контроля и его результатов может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев. Преимуществом периодического контроля по сравнению с разовым является то, что вероятность обнаружения опасных дефектов увеличивается, появляются возможности проведения сравнительного анализа результатов проведенных испытаний и набора соответствующей статистики. Недостатком является удорожание процедуры контроля и создание неоднократных перегрузок конструкции в процессе испытаний.

Мониторинг. Наблюдение в течение некоторого времени состояния объекта контроля при его работе в эксплуатационном режиме. Основные преимущества — наблюдение не требует изменения рабочих параметров и специального нагружения конструкции, упрощается процедура контроля и снижается его стоимость. Работа без перегрузок, требуемых при обычных испытаниях, продлевает срок службы конструкции. Недостат-

ками являются, во-первых, меньшая вероятность обнаружения дефектов, поскольку отсутствуют перегрузки, создаваемые при разовых испытаниях именно для активизации роста дефектов, во-вторых, отсутствие контроля за состоянием объекта

после завершения мониторинга, как и при разовых или периодических испытаниях.

Непрерывный мониторинг. Отсутствуют недостатки, отмеченные в трех предыдущих пунктах. Акустическая активность отслеживается постоянно, оснащение систем мониторинга средства-

Преимущества метода АЭ

Метод АЭ	Прочие методы
Материал объекта контроля сообщает информацию об имеющихся проблемах	Перед началом контроля необходимо определить, какую информацию следует получить и как ее интерпретировать
Автоматический 100%-ный контроль больших объектов	100%-ный контроль крупных объектов очень сложен, требует больших временных и денежных затрат
Непрерывный мониторинг крупных объектов обеспечивается постоянной работой аппаратуры	Непрерывный мониторинг крупных объектов во многих случаях невозможен, в остальных случаях требует серьезных затрат
Не требует постоянного контроля со стороны персонала	Работу выполняет персонал, что требует его постоянного присутствия при проведении контроля
Возможна работа оператора на большом удалении от объекта контроля	Оператор работает непосредственно на объекте, что создает угрозу жизни и здоровью при контроле опасных производств
Обеспечивает автоматизированную оценку и прогноз состояния конструкции в процессе ее эксплуатации	Для прогноза состояния конструкции требуются дополнительные расчеты и работа экспертов после проведения контроля

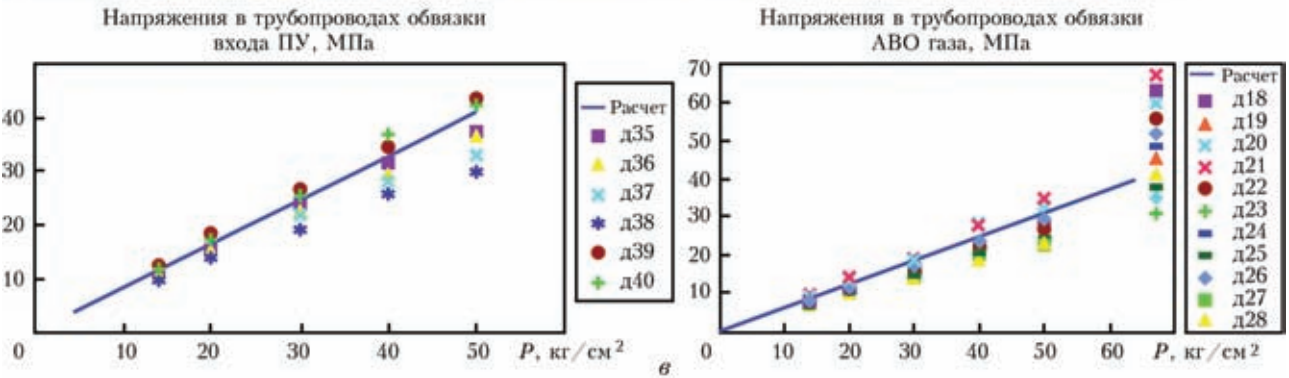


Рис. 6. Непрерывный мониторинг НДС трубопроводной обвязки ГС предприятия «Дигаз» при пуске компрессорного цеха: а — объект контроля; б — монтаж датчиков; в — НДС по результатам мониторинга



ми автоматизации позволяет оперативно в реальном времени получать информацию о состоянии контролируемого объекта и своевременно предотвращать опасные ситуации. На начальном этапе некоторые трудности создают необходимость стационарной установки датчиков, кабелей, измерительного оборудования, оснащения пульта оператора, обучения персонала и т. д.

Внедрение системы непрерывного мониторинга состояния оборудования и агрегатов обеспечивает их безопасную эксплуатацию, существенное снижение риска возникновения аварий, сокращение числа плановых остановов и внештатных ситуаций. Эффективность работы такой системы во многом зависит от заложенных в ее разработку принципов.

При разработке и совершенствовании техники и технологии АЭ мониторинга важно понимать, что заказчику требуется информационная система, а не просто измерительный прибор. Современная система мониторинга должна стать органичной частью общей информационной сети предприятия, постоянно обеспечивать персонал и руководство предприятия актуальными данными о состоянии объектов контроля, оперативно оценивать ситуацию и своевременно предупреждать об опасности [10].

Концепция повреждаемости и прогноз разрушения по данным АЭ. В ИЭС им. Е. О. Патона

НАНУ созданы и постоянно совершенствуются системы непрерывного АЭ мониторинга семейства ЕМА. Их на протяжении многих лет успешно применяют в производственных условиях для постоянного контроля состояния сосудов давления, хранилищ и оборудования цехов производства аммиака Одесского припортового завода, на мостовых переходах труб аммиакопровода Укрхимтрансаммиак, для периодического контроля различных конструкций на промышленных предприятиях Украины (рис. 3). За 10 последних лет АЭ контролем было охвачено приблизительно 1500 объектов. Следует отметить, что отличием систем ЕМА от существующих аналогов является не только уровень сервиса и удобство для пользователя. Системы ЕМА обеспечивают решение важной для промышленности задачи, а именно полностью автоматизированный ответ на вопросы:

- насколько опасно состояние конструкции в текущий момент;
- при какой нагрузке разрушится конструкция в данных условиях эксплуатации;
- какой остаточный ресурс конструкции.

Решить такую сложную задачу удалось на основе развития концепции повреждаемости [6–9, 14], понимаемой как потеря несущей способности вследствие появления и роста внутренних несплошностей. Проведенные исследования показали

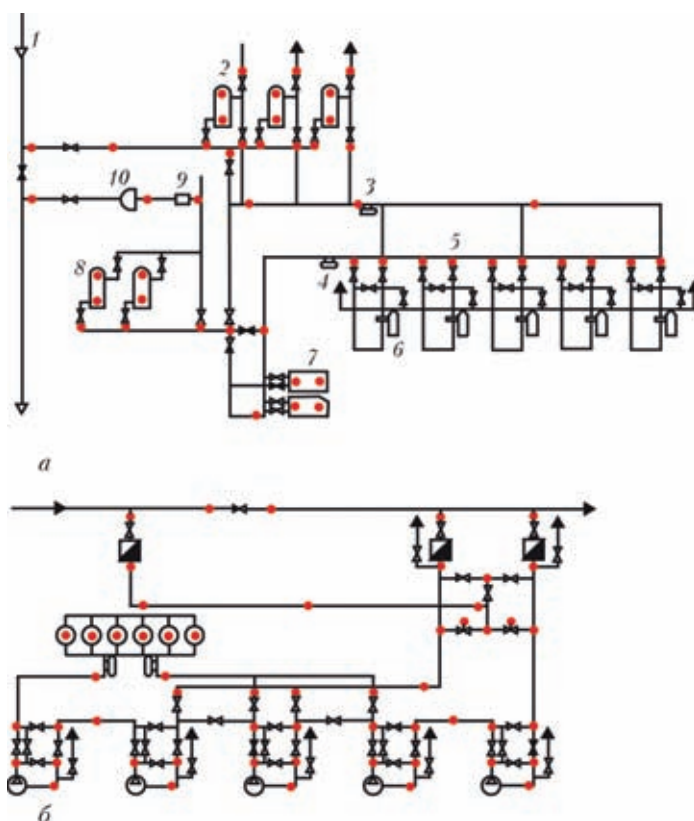


Рис. 7. Размещение датчиков АЭ (показаны красным цветом) при непрерывном АЭ мониторинге КС двух типов: а — с поршневыми ГПА; б — с центробежными нагнетателями (1 — газопровод; 2 — пылеуловитель; 3 — коллектор всасывающий; 4 — маслоуловитель; 5 — коллектор напорный; 6 — ГМК; 7 — холодильник оросительный; 8 — адсорбер; 9 — блок одоризации; 10 — замерный узел)



существование структурно-чувствительных механических параметров, например, коэффициента поперечной деформации, рассеяния твердости, плотности материала, изменение параметров акустических волн и ряда других, которые могут отражать с приемлемой точностью величину накопленной поврежденности.

Также показано, что на стадиях, предшествующих росту трещин, акустическая эмиссия при деформировании материала определяется полем накопленных в нем повреждений. В результате была предложена, обоснована, реализована на компьютере и экспериментально подтверждена модель, представляющая АЭ как результат динамического процесса возникновения и слияния несплошностей, представленных в рамках модели в виде сферических пор.

На базе разработанной модели предложен метод создания и распознавания эталонов, содержащих информацию о типовых процессах накопления повреждений в разных условиях и соответствующими им параметрами АЭ. Созданные эталоны служат основой для определения степени опасности состояния материала с накопленными повреждениями и прогнозирования разрушающих нагрузок, т. е. фактически реального предела прочности материала в данных условиях нагружения.

Алгоритм прогноза разрушающих нагрузок по данным АЭ формализован в виде специализированного программного обеспечения для систем технической диагностики семейства ЕМА. Результаты испытаний большого числа образцов и ряда конструкций показывают эффективность предложенной методики распознавания и прогноза.

В рамках концепции повреждаемости удалось на базе статистической обработки большого объема экспериментальных данных разработать методику расчета остаточного ресурса. Учитывая тему данной публикации, важно отметить, что основная часть упомянутых данных получена при исследовании состояния материала магистральных газопроводов на территории Украины, для которых была проведена комплексная оценка повреждаемости несколькими независимыми методами.

После всесторонней проверки методики прогнозирования разрушающих нагрузок и расчета остаточного ресурса были использованы в работе систем непрерывного мониторинга семейства ЕМА.

Системы непрерывного АЭ мониторинга. Системы АЭ диагностики и мониторинга ЕМА-3.9 включают быстродействующую измерительную аппаратуру для получения АЭ информации и программное обеспечение (ПО), реализующее современную технологию оценки состояния конструкций в процессе эксплуатации (рис. 4). Системы ЕМА используют передовые компьютерные технологии для передачи данных и интеграции с компьютерными сетями предприятий и Интерне-

та, включая использование GPRS в сетях операторов мобильной связи, и могут быть построены на базе АЭ приборов различных производителей, унифицированных по протоколу обмена с используемым ПО.

Системы ЕМА проходят метрологическую поверку на базе Госпотребстандарта Украины. Государственные стандарты Украины и нормативные документы, согласованные с Госгорпромнадзором Украины, обеспечивают их применение на различных промышленных конструкциях. На базе Госгорпромнадзора Украины и Технического комитета по технической диагностике и неразрушающему контролю Украины ТКУ-78 осуществляется обучение и сертификация специалистов по применению приобретенных систем. Существует сервисная служба, осуществляющая обслуживание и сопровождение аппаратуры и программного обеспечения в процессе эксплуатации систем.

Сегодня системы ЕМА являются наиболее широко используемыми на предприятиях Украины. Одной из причин выбора именно данных систем является их обеспеченность всем необходимым для внедрения — начиная с более чем 30-летнего опыта разработки и заканчивая техническим сопровождением в течение всего периода эксплуатации и обучения персонала.

Альтернативные решения. По имеющимся данным в настоящий момент на магистральных газопроводах и КС не существует внедренных в практику систем непрерывного АЭ мониторинга, подобных системам ЕМА, которые оценивали бы состояние материала и определяли его несущую способность и остаточный ресурс. Поэтому рассмотрим некоторые наиболее близкие по назначению технические решения, позволяющие контролировать состояние объектов газотранспортной отрасли на основе современных методов.

В качестве примера одного из методов диагностики можно привести применяемую российской компанией «НПО МОДУЛЬ СТС» [15] поисково-акустическую систему «ЭХО», предназначенную для оперативного обнаружения мест сужения проходного сечения трубопровода (отложения парафина, механических примесей, мест схлопывания на магистральных путепроводах), в том числе местоположения застрявших технических устройств (диагностических снарядов, очистных поршней и скребков). Система позволяет выполнять работы без вскрытия трубопровода с минимальным привлечением рабочих и технических средств.

В основе метода лежит тот факт, что при постоянном сечении трубопровода течение жидкости в нем имеет малую турбулентность без завихрений и разрывов однородности, и излучения звука практически нет. В местах нарушения однородности течения при помощи микрофона, приставленного к стенке трубы с внешней стороны, прос-



лушивается характерный шум протекающей жидкости. Этот характерный шум распространяется в обе стороны от источника и может быть обнаружен чувствительной аппаратурой на расстоянии до 100 м в зависимости от давления в трубопроводе и грунтовых условий (в сухом грунте дальность регистрации возрастает).

Место, где нарушается полнопроходимость сечения, выявляется по уменьшению интенсивности звука при удалении от источника при помощи специальной регистрации фонограммы на компьютере. Определение точного местоположения (позиционирование) с точностью до 1 м осуществляется корреляционным способом при помощи двух датчиков, расположенных по разные стороны от источника звука.

К недостаткам данной разработки можно отнести то, что используемый метод не предназначен для контроля повреждений в материале труб и не может быть использован для оценки и прогноза его состояния. То же можно сказать и про другие системы обнаружения утечек (СОУ) [16], такие как средства для измерения расхода газа на базе УЗ расходомеров, автоматизированные системы контроля трубопроводов «WaveControl» компании LB Sky Global, основанные на анализе сигналов АЭ, инфразвуковые системы мониторинга течей в трубопроводах «ИСМТ» разработки НПФ «ТОРИ» и др.

Предприятие «НПП Промдиагностика», г. Санкт-Петербург, опыт которого [17] включает диагностику 180 метров подземного газопровода, ДУ 1000 компрессорной станции «Тума», газгольдеров и ряда других промышленных объектов, разработало схему АЭ диагностики газонаполнительной станции. Метод АЭ рекомендуется использовать по следующим схемам, включающим в ряде случаев использование других средств НК.

Проводят АЭ контроль объекта. В случае выявления источников АЭ в месте их расположения проводят контроль одним из традиционных методов НК — ультразвуковым (УЗК), радиационным, магнитным (МПД), капиллярным (КД) и другими, предусмотренными нормативно-техническими документами (НТД). Данную схему используют при контроле объектов, находящихся в эксплуатации. При этом сокращается объем традиционных методов НК, поскольку в случае применения традиционных методов необходимо проведение сканирования по всей поверхности (объему) контролируемого объекта.

Проводят контроль одним или несколькими методами НК. При обнаружении недопустимых (по нормам традиционных методов контроля) дефектов или при возникновении сомнения в достоверности применяемых методов НК проводят контроль объекта с использованием метода АЭ. Окончательное решение о допуске объекта в эк-

сплуатацию или о ремонте обнаруженных дефектов принимают по результатам проведенного АЭ контроля.

При наличии в контролируемом объекте дефекта, выявленного одним из методов НК, метод АЭ используют для слежения за развитием этого дефекта. При этом может быть использован экономный вариант системы контроля, с применением одноканальной или малоканальной конфигурации АЭ аппаратуры.

Метод АЭ может быть использован для оценки остаточного ресурса и решения вопроса оносительно возможности дальнейшей эксплуатации объекта. Оценка ресурса проводится с использованием специально разработанной методики (данные по методике не приведены).

В настоящее время предприятие «НПП Промдиагностика» использует 16-тиканальную аппаратуру АЭ контроля собственной разработки СДАЭ-16, которая по информации предприятия является системой «пятого поколения» (метод классификации поколений аппаратуры не представлен). По конструктивному исполнению данная система имеет определенное сходство с 16-тиканальной системой ЕМА-3 образца 2003 г. (рис. 5), несколько уступая ей по техническим данным (число технологических каналов, динамический диапазон и др.).

Говоря о недостатках предлагаемых предприятием решений в первую следует отметить, что стационарного варианта системы СДАЭ — промышленного исполнения, с числом каналов, большим 16, предназначенного для длительного автоматизированного непрерывного мониторинга состояния материала — не существует. Об отсутствии опыта непрерывного АЭ мониторинга КС свидетельствуют и предложенные варианты проведения контроля. В отличие от систем ЕМА, которые проводят оценку состояния материала только по данным АЭ, предлагаемая технология контроля в настоящий момент не может обойтись без использования традиционных методов НК.

В связи с ограничениями, накладываемыми на объем данной публикации, перечислить все проводимые работы в области АЭ контроля было бы затруднительно, поэтому отметим только, что другие предприятия, осуществляющие АЭ контроль промышленных объектов, в частности, РАС, Digital Wave, Dunnegan, АЕТ (США), AVT (Великобритания, Норвегия), Acutest Ou (Финляндия), CGR, Aerospatiale (Франция), Vallen Systeme (Германия), Videoton, Gereb Es Tarsa (Венгрия), CVUT (Чехия), Институт механики в Болгарии, Институт сварки в Гливице (Польша), Институт ядерных исследований им. С. Курчатова, Ростовский университет, предприятия «Алькор» и «Интерюнис» (Россия), используют аналогичные НПП «Промдиагностика» методики проведения АЭ испытаний.



Помимо разработок в области АЭ диагностики, весьма интересен (рис. 6) пример установки предприятия «Дигаз», г. Москва, системы непрерывного мониторинга трубопроводной обвязки газокompрессорной станции, основанной на оценке напряженно-деформированного состояния материала (НДС). Месторасположение данной КС характеризуется сложными геологическими условиями:

- высоким уровнем грунтовых вод;
- сезонными подвижками грунта;
- возможностью размыва грунта и образования пустот.

Задачей мониторинга является обеспечение контроля НДС трубопроводной обвязки всех групп оборудования, а также подземных трубопроводов. Для опытной эксплуатации системы мониторинга было использовано минимально необходимое количество датчиков, для чего они были установлены только в зонах концентрации напряжений. Для определения местоположения таких зон проведены расчеты НДС обвязок газоперекачивающих агрегатов, аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа и пылеуловителей (ПУ) на основе метода конечных элементов. В качестве источника информации о НДС использованы датчики деформации струнного типа.

Данный пример представляется наиболее интересным с практической точки зрения, хотя он и не имеет отношения к АЭ контролю. Постоянное отслеживание напряженного состояния материала является важным средством обеспечения безопасности объектов контроля. Как и непрерывный АЭ мониторинг, данное средство позволяет оперативно реагировать на изменения в напряженном состоянии и своевременно предпринимать меры по недопущению перегрузок.

Следует отметить успешный опыт применения подобной технологии и в Украине. Оборудование и технология оценки напряженного состояния разработаны совместно специалистами НГУУ «КПИ» и ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ и применяются, в частности, при непрерывном мониторинге и периодическом контроле состояния аммиакопроводов предприятия «Укрхимтрансаммиак».

К сожалению, как уже отмечалось выше, метод измерения НДС при помощи деформометров не позволяет, в отличие от метода АЭ, обеспечить полный контроль даже одного участка трубопровода КС, не говоря уже о всей обвязке, поскольку НДС замеряется непосредственно под датчиком. Поэтому, если сравнивать такой метод мониторинга с методом АЭ, преимущества последнего проявились бы наиболее полно — датчики на газовых трубах, как показывает имеющийся у специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ опыт контроля труб магистральных газопроводов, газораспределительных станций и другого газового оборудования, в некоторых случаях можно разме-

щать на расстоянии до 80...100 м один от другого, при этом полностью контролируя весь участок трубы между ними.

Предложения по внедрению непрерывного АЭ мониторинга. Учитывая имеющийся в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ опыт [6–14] по созданию и эксплуатации более 10 стационарных систем непрерывного АЭ мониторинга потенциально опасных промышленных объектов (первая в Украине была установлена в 2002 г. на ОПЗ), имеющуюся материально-техническую базу по технической и интеллектуальной поддержке эксплуатации оборудования, необходимые возможности по подготовке специалистов и методических материалов, оснащение магистральных газопроводов и КС системами мониторинга семейства ЕМА представляется наиболее перспективным.

Контроль магистрального газопровода представляет собой во многих вопросах отработанную технически, хотя и требующую определенных затрат на оборудование, задачу. Учитывая высокую чувствительность метода АЭ, расстояние между соседними датчиками может составлять, как упоминалось выше, десятки метров. При этом будет обеспечен стопроцентный контроль состояния трубы. В настоящее время существуют технические решения, при которых связь датчиков с измерительным оборудованием может осуществляться без проводов, в частности, с использованием мобильной сотовой сети. Разработанные методы локализации сигналов АЭ позволяют определять координаты возникших повреждений с достаточно высокой точностью при неравномерном размещении датчиков, что решает задачу повышения надежности локализации на наиболее опасных участках.

Компрессорная станция в зависимости от количества ниток магистральных газопроводов может состоять из одного, двух и более компрессорных цехов, оборудованных одним или несколькими типами ГПА. Как правило, каждый цех КС работает на свой газопровод. Из-за технологических соображений транспорта газов, компрессорные цеха могут быть соединены специальными переключками, на входе и выходе станции.

Типовая технологическая обвязка [3–5] компрессорного цеха предназначена для обеспечения приема на станцию транспортируемого по газопроводу технологического газа, его очистки от механических примесей и капельной жидкости в специальных ПУ и фильтр-сепараторах, распределения потоков газа по газоперекачивающим агрегатам с обеспечением их оптимальной загрузки, возможности охлаждения газа после его компримирования перед подачей в газопровод, вывода цеха для работы на «стационарное кольцо» при пуске и остановке, а также транзитного прохода транспортируемого газа по магистральному газопроводу, минуя КС. Кроме того, технологическая



обязка компрессорного цеха должна обеспечивать возможность сброса газа в атмосферу из всех его технологических газопроводов через специальные свечные краны.

В зависимости от типа центробежных нагнетателей, используемых на КС, различают основные принципиальные схемы обвязок ГПА с параллельной, коллекторной обвязкой, характерную для полнонапорных нагнетателей, и схему с последовательной обвязкой.

С точки зрения установки датчиков АЭ не существует принципиальной разницы, какую из схем обвязки используют на конкретной КС. Для монтажа стационарной системы непрерывного АЭ мониторинга основными являются вопросы физического размещения измерительных блоков (в специальных взрывопожарозащищенных контейнерах) и прокладки линий коммуникации.

В качестве примера покажем вариант возможного размещения датчиков АЭ на двух типах КС (рис. 7). Приведенные схемы обеспечивают полный, стопроцентный контроль выбранных участков с акцентированием особого внимания на наиболее опасных местах (агрегатах, задвижках и т. д.). Отметим еще раз, что метод АЭ позволяет контролировать не только места, где расположены датчики, но и участки между ними. Дополнительно, по желанию заказчика, система может регистрировать и эксплуатационные параметры, такие как нагрузка, давление, температура и др., с последующим их анализом совместно с получаемыми данными АЭ контроля.

Кабельные линии связи от мест установки датчиков прокладывают до литых алюминиевых шкафов-контейнеров, в которых размещены подсистемы АЭ и источник бесперебойного питания, оснащенных системами климатконтроля (аппаратурные шкафы).

Электрический сигнал, поступающий от датчиков, оцифровывается и поступает на предварительную обработку одной из подсистем АЭ, а оттуда по компьютерной сети результат обработки направляется в центральный управляющий сервер. Управляющий сервер служит одновременно для окончательной обработки поступившей информации, вывода ее на экран монитора или терминала, принятия решения о состоянии объекта контроля и передачи результатов контроля одному или нескольким клиентам.

Эффективная работа систем ЕМА достигается также их интеграцией с заводскими компьютерными сетями и Интернет. Сегодня имеется накопленный положительный опыт авторского надзора специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ за результатами непрерывного АЭ мониторинга, создания интегрирующих информационных систем, объединяющих результаты мониторинга разных объектов на одном экране и проводящих их сов-

местный анализ. Развитие телекоммуникационных средств позволило разработать для систем ЕМА наиболее современные способы передачи АЭ информации с использованием мобильного Интернета, учитывая постоянное улучшение качества мобильной связи, расширение зон покрытия и повышение мощности компьютеров.

Отметим также, как весьма важную, экономическую составляющую при решении данной проблемы. Оснащение КС системами непрерывного АЭ мониторинга, как показывает опыт эксплуатации таких системна других предприятиях, обеспечивает достаточно быструю самоокупаемость (6–12 месяцев) и обеспечивает следующие источники рентабельности:

- сокращение простоев;
- снижение числа плановых остановок;
- предотвращение аварий;
- сокращение времени контроля;
- сокращение времени и расходов на запуск после испытания или ремонта;
- снижение расходов на оплату процедуры контроля;
- снижение расходов на принятие решения о состоянии конструкции;
- сокращение численности контролирующего персонала;
- снижение расходов на диагностическое обслуживание;
- унификация процедуры контроля для всего предприятия;
- снижение затрат на замену оборудования и программного обеспечения за счет унификации обмена данными;
- снижение расходов на обучение специалистов.

Таким образом, имеются все необходимые аппаратные, программные и организационные средства для оснащения магистральных газопроводов и КС системами непрерывного АЭ мониторинга, а их использование является источником обеспечения безопасной эксплуатации и повышения рентабельности работы объектов газотранспортной отрасли.

1. Анализ причин аварийности // Газовая промышленность. — 1989. — № 10. — С. 2–5.
2. Должанский П. Р. Контроль надежности металла объектов котлонадзора. — М.: Недра, 1985. — 264 с.
3. <http://www.sgaustin.ru>
4. Никишин В. Н., Коршаков Б. П. Энергетика трубопроводного транспорта газа / Под ред. А. Н. Казаченко. — М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. Е. М. Губкина, 2001.
5. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. — М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. Е. М. Губкина, 1999.
6. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 3–11.
7. Недосека А. Я., Недосека С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) // Там же. — 2010. — № 2. — С. 7–17.



8. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 812 с.
9. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 3. — С. 11–17.
10. Недосека С. А., Недосека А. Я. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Там же. — 2005. — № 3. — С. 20–26.
11. Недосека С. А. Контроль линии синтеза аммиака системой АЭ диагностики ЕМА-3У // Там же. — 2003. — № 4. — С. 24–28.
12. Об опыте применения АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 4. — С. 85–95.
13. Особенности функционирования технологических трубопроводов при высоких температурах / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
14. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. — 2010. — № 1. — С. 9–16.
15. <http://npomodul-sts.ru>
16. <http://leakdetection.ru>
17. <http://www.promdiagnostika.ru>

Поступила в редакцию
03.11.2011

ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Крым, Большая Ялта,
Дом творчества ученых «Кацивели» НАНУ, 29 мая – 01 июня 2012 г.



Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Международная ассоциация «Сварка»
Местный благотворительный фонд «Содружество сварщиков»

Тематика конференции

Математическое моделирование:

- ♦ физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловложений при сварочном нагреве;
- ♦ процесса переноса металла при сварке;
- ♦ образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- ♦ кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- ♦ кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- ♦ зависимости химический состав — микроструктура — механические свойства;
- ♦ кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин и условий их предупреждения;

- ♦ термодинамических процессов при сварке давлением с учетом больших деформаций;
- ♦ транспорта водорода в сварных соединениях;
- ♦ оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- ♦ остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- ♦ деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- ♦ процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний.

**Информационные технологии в сварке,
наплавке и нанесении покрытий.**

- ♦ Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский.
- ♦ Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 15 марта 2012 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.
- ♦ Требования к оформлению тезисов: Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кегель 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 15.03.2012 г. Рассылка второго информационного сообщения до 30.03.2012 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 20.04.2012 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-74
E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua



ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ МЕТАЛЛА КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

Л. М. ЛОБАНОВ, акад. НАНУ, **В. А. НЕХОТЯЩИЙ**, инж., **М. Д. РАБКИНА**, докт. техн. наук, **В. А. КОСТИН**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев), **В. В. ХАРЧЕНКО**, докт. техн. наук, **Е. А. КОНДРЯКОВ**, канд. техн. наук (ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины), **В. В. УСОВ**, докт. физ.-мат. наук, **Н. М. ШКАТУЛЯК**, канд. физ.-мат. наук (ЮУНПУ им. К. Д. Ушинского)

Приведены результаты систематических исследований, включающие магнитный, металло-, фратографический и рентгеноструктурный анализы металла кислородных баллонов. Показано, что техническое состояние баллонов, а не срок службы, является решающим фактором для их безопасной эксплуатации. Отмечена также необходимость повышения физико-механических характеристик стали за счет улучшения технологии ее изготовления.

The paper gives the results of systematic studies, including magnetic, metallographic, fractographic and X-ray structural analyses of oxygen bottle metal. It is shown that the bottle technical condition, and not their service life, is the decisive factor of their safe service. The need to improve the physico-mechanical characteristics of steel through improvement of its production technology is also noted.

В бесшовных баллонах среднего объема отечественного производства зафиксировано неравномерное распределение коэрцитивной силы [1–3]. В работах [2, 3] отмечается влияние напряженно-деформированного состояния, обусловленного изготовлением и эксплуатацией, в [1] для определенной части баллонов установлена линейная корреляция между величиной коэрцитивной силы $H_c(y)$ и толщиной стенки $\delta(x)$, что, в свою очередь, может быть использовано для обнаружения опасных зон и, соответственно, повышения безопасной эксплуатации. Однако, в ряде случаев имеет место нарушение линейной зависимости, что, по всей видимости, отражает конкурирующую роль структурно-текстурных параметров металла в формировании величины коэрцитивной силы [4].

Цель настоящей работы — исследовать изменение структуры и сопротивляемость хрупкому разрушению стали Дс в связи с влиянием пластической деформации на значение и распределение коэрцитивной силы в цилиндрических оболочках кислородных баллонов.

Материалы и методика эксперимента. Из партии кислородных баллонов для исследования был выбран баллон Б1 с большим сроком эксплуатации (табл. 1), характерным отличием которого является специфическое распределение коэрцитивной силы в цилиндрической стенке (рис. 1, а) с двумя четко выраженными участками (между образующими Р5—Р6 и Р13—Р14) повышенных значений (6,0...7,9 А/см).

Баллон был подвергнут гидравлическому испытанию статическим давлением. Для предотвращения деформации на участке баллона, прилега-

ющему к днищу, перед испытанием был установлен бандаж (рис. 2). На первом этапе испытания баллон был нагружен давлением $P = 32,5$ МПа, что вызвало начало пластического деформирования цилиндрической стенки. После сброса давления отмечено увеличение значений коэрцитивной силы до 8,5 А/см на участке между образующими Р5—Р6 (рис. 1, б). На этом же участке при давлении 51,9 МПа баллон разрушился. Увеличение периметра баллона в неразрушенной части составило 4,9 %. По данным коэрцитиметрии ($H_c = 9...10,5$ А/см) разрушение произошло при напряжениях, отвечающих пределу прочности стали Дс [5]. Исходя из результатов гидроиспытания, разрушающее давление превысило расчетное в 2,8 раза, а рабочее — в 3,5 раза, что, согласно [2], допускало возможность продления срока эксплуатации.

Для дальнейших исследований из разрушенного баллона были отобраны пробы — из участка с наибольшей деформацией, а также из участка, находящегося под бандажом (рис. 1, в и рис. 2).

Спектральным анализом было установлено, что химический состав металла баллона соответствует стали Дс (табл. 2).

Металлографический анализ проводили на продольных и поперечных шлифах, перпендикулярных толщине стенки баллона, при помощи микроскопа «НЕОРНОТ-32». Травление микроструктуры осуществляли в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты. Твердость по Виккерсу при нагрузке 100 г была измерена на микротвердомере М-400 фирмы «LECO».

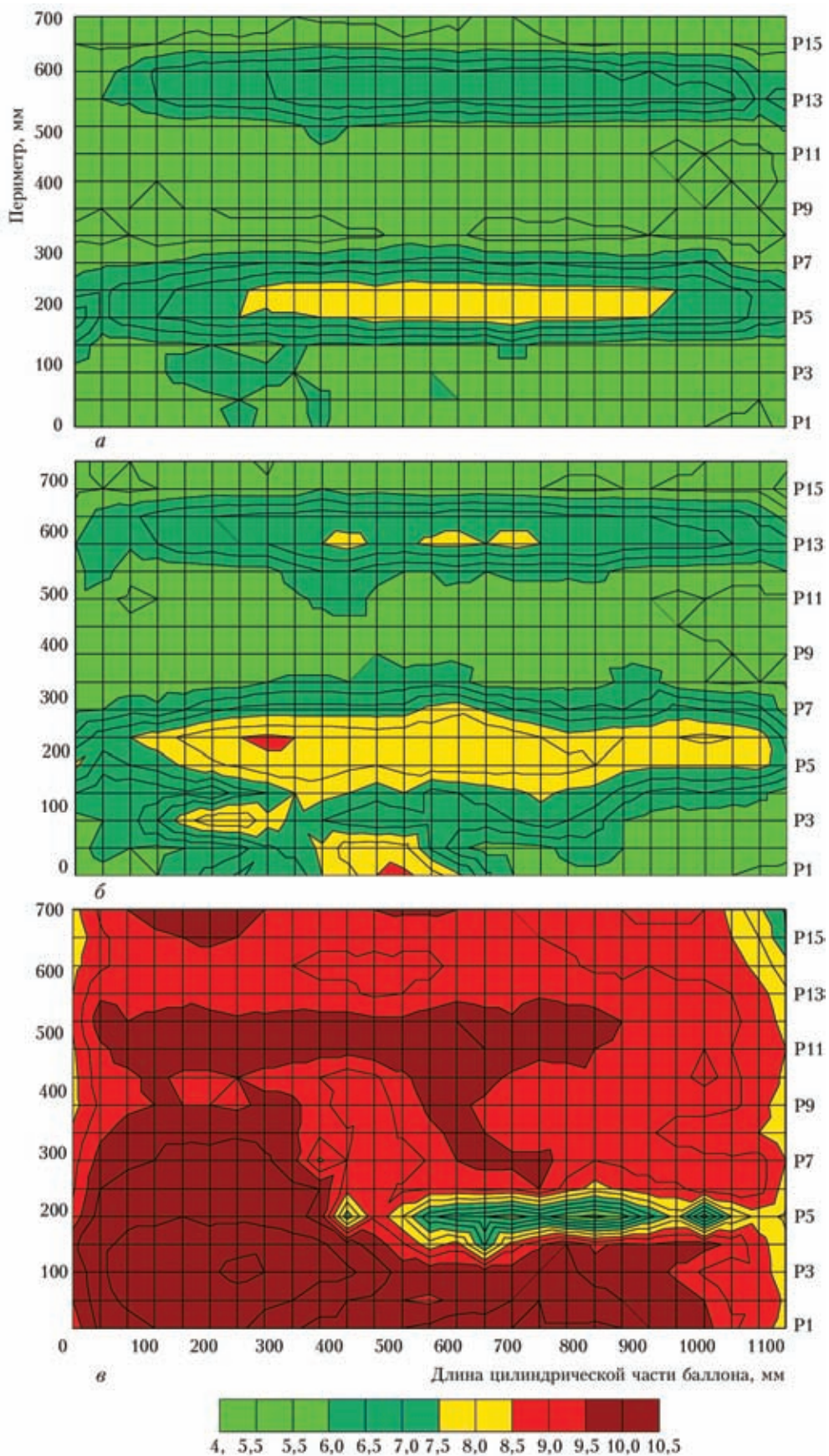


Рис. 1. Распределение коэртитивной силы (H_c , А/см) в металле баллона Б1 в исходном состоянии (а); после нагружения давлением 32,5 МПа (б); после разрушения при 51,9 МПа (в) (Р1—Р15 — образующие цилиндрической части баллона)



Рентгеноструктурный анализ выполняли согласно методике построения обратных полюсных фигур (ОПФ) [6,7]. Измеряли интегральные интенсивности дифракционных рефлексов от кристаллографических плоскостей {110}, {200}, {211}, {220}, {310}, {222}, {321}, {400}, {330} образцов и эталона, который был приготовлен из мелких рекристаллизованных опилок стали Дс. Исследовали следующие сечения отобранных фрагментов: наружный и внутренний слои, а также сечение, перпендикулярное продольной оси цилиндрической поверхности баллона. Во всех случаях перед съемкой кривых полюсной плотности соответствующие поверхности химически полировали на глубину 0,1 мм для удаления искаженного механической обработкой слоя. Исследуемые образцы и эталон подвергали θ -2 θ -сканированию на дифрактометре «ДРОН-3» по методу Брега-Брентано в одинаковых геометрических условиях съемки. Находили отношения интегральных интенсивностей линий дифракции исследуемых образцов и эталона. Приведенная полюсная плотность P_{hkl} пропорциональна отношению интенсивности линии (hkl) в текстурованном образце и образце без текстуры [6, 7]:

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T}{I_{hkl}^0} K, \text{ где } K = \frac{1}{\sum_{\Delta} A_{hkl} I_{hkl}^T / I_{hkl}^0}, \sum_{\Delta} A_{hkl} = 1.$$

$$\text{Таким образом, } P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T / I_{hkl}^0}{\sum_{\Delta} A_{hkl} I_{hkl}^T / I_{hkl}^0}, \text{ где } I_{hkl}^T —$$

интегральная интенсивность линии { hkl } в текстурованном образце; I_{hkl}^0 — то же для образца без текстуры.

Значение коэффициентов A_{hkl} для ОЦК-решетки приведены в табл. 3.

Нормировку полученных отношений проводили по методике Морриса [7]. При этом для увеличения точности интегральные интенсивности дифракции от плоскостей первого и высших порядков, например, от (110) и (220) учитывали как среднее арифметическое.

Механические характеристики металла баллонов из стали Дс получены при испытаниях на одноосное растяжение цилиндрических и плоских образцов на приборе Instron 8802.

Испытания на ударный изгиб проводили согласно стандарту ISO 14556–2000 в диапазоне температур $T = -120...+80$ °С на вертикальном инструментированном копре, спроектированном и изготовленном в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ [8]. Использовали малоразмерные образцы Шарпи согласно РД ЭО 0598–2004, вырезанные в осевом направлении, с надрезами, выполненными в кольцевом направлении. По результатам испытаний согласно

методике, предложенной в работе [9], были определены энергии разрушения и ударная вязкость:

$$A(t_1, t_2) = \frac{1}{m} \left[q(t_1) - \frac{1}{2} \Delta q(t_1, t_2) \right] \Delta q(t_1, t_2),$$

где $q(t) = mV(t)$; m — масса ударника; V — скорость ударника.



Рис. 2. Баллон Б1 с бандажом после гидравлического испытания статическим давлением 51,9 МПа; 1 — участок пробы из зоны с наибольшими значениями кольцевой деформации — 6...7 %; 2 — бандаж



Таблица 1. Объективные данные исследуемых баллонов из стали Дс

Баллон	Заводской номер	Срок службы, лет	Толщина стенки		Коэффициентная сила, А/см		Результаты испытаний		
			min...max	σ^*	min...max	H_c^{**}	Разрушающее давление $P_{\text{разр}}$, МПа	Увеличение периметра в неразрушенной части баллона, %	Фактический запас прочности, $m = P_{\text{разр}}/P_{\text{расч}}$
Б1	86482	48	7,3...8,9	7,4	4,7...9,2	7,7	51,9	4,9	2,65
Б2	91200	45	5,6...9,0	6,2	6,0...9,4	7,1	49,9	1,8	2,86 (брак металла)
Б3	39280	18	7,4...9,3	8,8	5,1...7,8	5,9	55,1	1,6	2,38 (брак металла)
Б4	147710	52	7,3...9,2	7,5	4,3...6,3	5,1	51,4	4,1	2,91
Б5	269418	36	6,6...8,5	6,6	4,6...8,3	-	48,3	3,95	2,87
Б6	49607	49	7,4...8,0	7,8	4,7...6,9	4,7	47,3	4,7	2,58
Б7	153737	56	7,8...9,6	8,5	4,3...7,1	5,2	49,3	1,8	2,11 (брак металла)
Б8	758	0	7,5...9,4	7,7	5,4...7,0	5,8	56,7	4,8	2,76
Б9	25	0	7,6...8,6	7,7	6,0...8,7	7,5	58,9	4,2	2,71
Б10	89952	48	6,1...10,3	-	-	4,2...7,7	не испытан	-	-

Примечание. Исходные значения δ^* и H_c^{**} участков стенки, по которым произошло разрушение

Удельная энергия деформирования и разрушения (KCV) определялась по формуле: $E_{\text{уд}} = \frac{E}{S}$, где S — площадь поверхности излома; E — энергия разрушения. Для вычисления значений энергий деформирования и разрушения на отрезке времени от t_1 до t_2 определяли запас количества движения к началу интервала времени t_1 и изменение Δq в этом интервале.

S-образные кривые вязко-хрупкого перехода были получены путем аппроксимации данных с помощью функции Больцмана:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x - x_0)/dx}} + A_2.$$

Фрактографический анализ проводили с помощью растрового электронного микроскопа «JSM-840» при увеличениях $\times 10... \times 1000$ и ускоряющем напряжении 20 кВ в режиме SEI и BEI. Использование режима BEI обусловлено тем, что для исследования образцов в этом режиме нет необходимости проводить их травление с целью выявления микроструктуры. Контраст изображения в данном режиме обусловлен различием в химическом составе структурных составляющих. С помощью платы захвата изображения MicroCapture электронное изображение поверхности изучаемых изломов передавалось на экран компьютера с последующей оцифровкой и запоминанием его в циф-

ровом виде. Переведя электронное изображение в цветное, программа Image Pro позволяет достаточно точно определить долю каждого участка: хрупкого, вязкого и квазискола.

Результаты и их обсуждение. Металлографическая структура металла баллона представляет собой мелкозернистую феррито-перлитную смесь, типичную для баллонной стали Дс. Балл зерна феррита находится в диапазоне №8—№10 по ГОСТ 5639–82 «Стали и сплавы». Интересно отметить с внутренней поверхности стенки баллона в металле, находящемся под бандажом, наличие обезуглероженного слоя на глубину до 100 мкм, со значением микротвердости 1,91...1,99 ГПа (по сравнению с остальной массой металла — 2,27...2,45 ГПа). Здесь же наблюдаются глубокие трещины и отслоения (рис. 3, а). В металле, перенесшем деформацию (рис. 3, б), имеет место деформированный слой глубиной 50...60 мкм. Значения микротвердости достигают здесь величины 2,03...2,13 ГПа.

Таким образом, металлографическая структура оболочки Б1 мелкозернистая, неоднородная с явно выраженным приповерхностным слоем с внутренней стороны. В исходном состоянии (под бандажом) этот слой имеет признаки обезуглероживания. После разрушения при гидравлических испытаниях приповерхностный слой деформируется на глубину до 60 мкм.

Таблица 2. Химический состав металла баллона

Проба	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
Б1	0,443	0,394	0,91	≤0,025	0,019	0,10	0,08	<0,03
Ту 14-157-15	0,43...0,53	0,17...0,37	0,7...1,0	≤0,045	≤0,045	≤0,35	≤0,25	-



Таблица 3. Коэффициенты нормировки для расчета P_{hkl} ОПФ [6]

hkl	A_{hkl}
110	0,126
200	0,052
211	0,109
310	0,270
222	0,074
321	0,370

В связи с неоднородностью приповерхностных слоев представлялось целесообразным изучить их кристаллографические ориентировки.

Кристаллографическая текстура. Значения полюсной плотности P_{hkl} в различных сечениях цилиндрической поверхности баллона Б1 под бандажом и вне бандажа приведены в табл. 4.

Из представленных данных видно, что текстура Б1, как в исходном состоянии, так и в наиболее деформированном сечении ($H_c \sim 11$ А/см) в основном характеризуется наличием плоскостей $\{001\}$, $\{110\}$ и $\{112\}$, параллельных цилиндрической поверхности, так как их плотность на полюсных фигурах превышает единицу, которая соответствует отсутствию текстуры. При этом с осью цилиндрической поверхности баллонов преимущественно совпадают кристаллографические направления, расположенные от $\langle 100 \rangle$ до $\langle 110 \rangle$. Другими словами, преимущественными компонентами текстуры являются следующие ориентировки: $\{001\} \langle 110 \rangle$ — основная, так как полюсная плотность P_{001} наибольшая; $\{112\} \langle 110 \rangle$ — рассеяние основной ориентировки и $\{110\} \langle 001 \rangle$ — ориентировка текстуры сдвига.

Как известно, кристаллографические плоскости семейства $\{001\}$ являются в ОЦК-металлах и сплавах основными плоскостями скола [10]. Поэтому при формировании в металле текстуры, которая характеризуется расположением этих плоскостей параллельно плоскости прокатки, можно ожидать повышенной склонности листов и конструкций из них к слоисто-хрупкому разрушению, особенно при развитии трещин нормального от-

Таблица 4. Распределение P_{hkl} в металле Б1

hkl	Поверхность под бандажом		Поверхность вне бандажа	
	наружная	внутренняя	наружная	внутренняя
001	1,31	1,46	1,50	1,54
110	1,24	1,25	1,13	1,33
112	1,06	1,17	1,10	1,15
310	0,98	0,92	0,91	0,85
222	0,93	0,97	0,98	0,93
321	0,88	0,86	0,92	0,89

Примечание. Значения, меньшие 1, в расчетах не применяются

рыва [11–13]. Тем не менее, наличие в металле баллона компоненты текстуры сдвига $\{110\} \langle 110 \rangle$ в определенной степени уменьшает склонность металла к этому виду разрушения [14].

Следует отметить, что под бандажом (в исходном состоянии) текстура основной компоненты $\{001\} \langle 110 \rangle$ более острая с внутренней поверхности по сравнению с наружной ($P_{001} = 1,46/1,31$). В свою очередь, после разрушения эта ориентировка также возрастает с внутренней поверхности ($P_{001} = 1,54/1,46$). Однако особенно резко она увеличивается с наружной поверхности ($P_{001} = 1,50/1,31$). Что касается плоскостей сдвига $\{110\}$, то после разрушения эта ориентировка ослабевает с наружной (1,24/1,13) и усиливается с внутренней поверхности (1,25/1,33).

Таким образом, данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о неравномерном распределении кристаллографической текстуры по сечению оболочки. При этом в результате пластической деформации наблюдается по существу увеличение «опасной» компоненты по толщине стенки при накоплении «вязкой» составляющей только с внутренней поверхности.

Механические свойства. В связи с изменениями в результате гидравлических нагрузок структурно-текстурных параметров металла по сравнению с исходным состоянием представляло интерес определить также влияние деформации на механические характеристики металла сечения с наиболее высо-

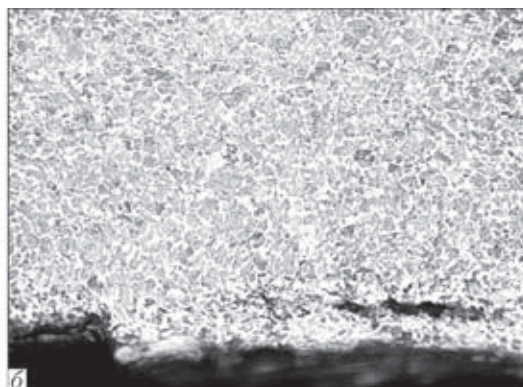
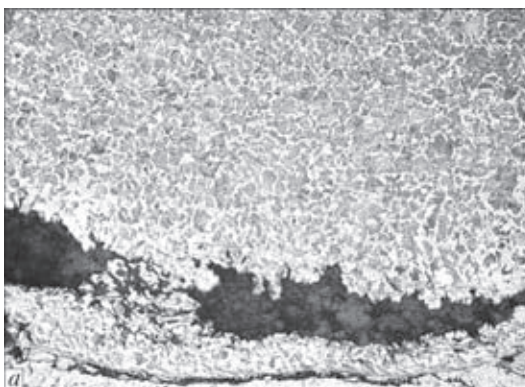


Рис. 3. Структура ($\times 200$) с внутренней поверхности стенки Б1: а — под бандажом; б — вне бандажа



кими значениями коэрцитивной силы. Установлено, что предел текучести металла баллона Б1 (см. рис. 1, в) увеличился здесь почти на 40 % по сравнению с участком, находящимся под бандажом; выросло также относительное удлинение — примерно на 20 % (табл. 5).

В то же время временное сопротивление и относительное сужение изменились незначительно. Аналогичные исследования были проведены на металле Б6 (табл. 5). Интересно отметить, что в данном случае также имеют место значительные изменения предела текучести металла (примерно на 30 %) и показателей пластичности, тогда как временное сопротивление не претерпело существенных изменений.

Поскольку при выборе материалов для конструкции, которая может быть подвержена механическим воздействиям существенным фактором, как известно, является температура вязко-хрупкого перехода T_x , представляло интерес определить также влияние пластической деформации на сопротивление разрушению металла при ударных нагрузках.

Ударная вязкость малоразмерных образцов Шарпи. Несмотря на то, что дискуссионным остается вопрос, в какой мере хрупко-вязкий переход является инженерным свойством, которое формируется напряженным состоянием конструкции или определяется физическими свойствами конкретного материала, на ход этой кривой заметное влияние оказывает состав стали, ее микроструктура, количество и распределение неметаллических включений, размер исходного аустенитного зерна и т. д.

Следует отметить, что температурной зависимости ударной вязкости стали Дс баллона Б1 в исходном состоянии (под бандажом) присуща типичная для металлов и сплавов с ОЦК-решеткой форма кривой хрупко-вязкого перехода (рис. 4, кривая 1). В результате гидроиспытаний произошло пластическое деформирование металла в целом. На локальном участке, по всей видимости, это привело к образованию равномерной ячеистой дислокационной субструктуры, что обусловило снижение T_x на этом участке (рис. 4, кривая 2). По-

лученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [15, стр. 159–161], где обращено внимание на то, что образование равномерной субструктуры в трубных сталях при больших степенях обжатия снижает T_x . В связи с этим представляло интерес оценить влияние деформации, вызванной гидроиспытаниями, на механические свойства металла других ранее исследованных баллонов [1, табл. 1].

Были отобраны пробы из разрушенных при давлениях 49,9 и 55,1 МПа баллонов Б2 и Б3 и претерпевших наибольшие деформации 1,8 и 1,6 % соответственно (см. табл. 1). Разрушение Б2 было инициировано участком цилиндрической стенки толщиной (6,2 мм) и с относительно высокими значениями коэрцитивной силы в кольцевом и осевом направлениях 7,5 и 9,4 А/см, что свидетельствует о перегрузке, вызвавшей текучесть металла. Хрупкое разрушение Б3 с образованием пяти осколков было инициировано браком участка стенки (закатом металлургического происхождения).

Выбор именно этих баллонов для дальнейших исследований обусловлен тем, что в металле Б2 выявлена типичная мелкозернистая структура с баллом зерна феррита № 8, присущая обычной структуре баллонной стали Дс [16, 17]. В Б3 наблюдается крупнокристаллическая структура с баллом зерна № 3 и тонкими выделениями полигонального феррита по границам перлитных зерен, что свидетельствует о значительном перегреве металла, возможно как на стадии изготовления, так и в период эксплуатации.

Что касается кристаллографической текстуры, то как и в Б1 она в основном характеризуется наличием плоскостей {001}, {110} и {112} с их неоднородным распределением по толщине стенки баллонов (табл. 6). Кроме того, в Б3, так же как и в предыдущем случае, полюсная плотность основной компоненты {001}<110> увеличивается от наружной поверхности ($P_{001} = 1,27$) к внутренней ($P_{001} = 1,50$). В Б2, в отличие от Б3 и Б1, по всему сечению толщины стенки преобладает текстура плоскостей сдвига, что, как будет показано, от-

Таблица 5. Результаты механических испытаний

Вырезка образцов		Временное сопротивление σ_B , Н/мм ²	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
Б1	Под бандажом	730,7	382,1	22,2	56,9
	Вне бандажа	763,8	530,1	17,9	54,5
Б2	После разрушения	796,7	484,9	21,4	39,1
Б3	После разрушения	730,2	445,8	15,2	35,6
Б4	После разрушения	663,0	498,1	16,6	24,4
Б5	После разрушения	712,5	536,9	-	33,0
Б6	Исходное состояние	682,4	416,8	27,8	48,8
	После разрушения	703,2	539,7	23,4	37,3



ражается на повышении сопротивления металла хрупкому разрушению (рис. 5).

Ударные испытания малоразмерных образцов Шарпи, изготовленных из металла Б2 и Б3, были проведены в диапазоне температур $T = -50...+120$ °С. Результаты, приведенные на рис. 5, свидетельствуют, прежде всего, о значительной хрупкости металла обоих баллонов, поскольку при комнатной температуре они имеют достаточно низкие значения ударной вязкости. Тем не менее, следует отметить более высокое сопротивление хрупкому разрушению мелкозернистой структуры с благоприятной кристаллографической текстурой (рис. 5, кривая 1) по сравнению с крупнозернистой структурой с преимущественным содержанием плоскостей скола (рис. 5, кривая 2). Однако в области вязкого разрушения на верхнем шельфе менее прочный металл Б3 оказывается более вязким по сравнению с более прочным металлом Б2 (см. табл. 5).

Таким образом, увеличение прочностных характеристик металла баллонов за счет структурных факторов приводит к увеличению сопротивления металла хрупкому разрушению и некоторому снижению сопротивления вязкому при ударных нагрузках. Кроме того, пластическая деформация металла при гидроиспытаниях баллонов обуславливает изменения субструктуры и крис-

таллографические преобразования, что проявляется в характере кривых вязко-хрупкого перехода.

Для детального изучения сопротивления металла разрушению был применен фрактографический анализ изломов ударных образцов.

Результаты фрактографических исследований изломов. С целью определения общего характера разрушения предварительные исследования проводились при увеличении $\times 20$. Это позволило точно установить положение участков хрупкого, вязкого разрушения и квазискола, а также с помощью программы Image Pro — долю каждого из них в изломе (табл. 7).

Как известно, энергия разрушения состоит из энергии зарождения микротрещин и/или микропор, и энергии их распространения. Чем выше оба эти параметра, тем выше ударные свойства металла. При низких температурах энергия их распространения практически равна нулю, а полная энергия почти равна энергии их зарождения. Поскольку распространение микротрещин обусловлено подвижностью дислокаций, то энергия их распространения практически одинакова для широкого класса сталей и составляет $10...15$ Дж/см². Поэтому металл исследуемых баллонов имеет по существу одинаковую энергию нижнего шельфа (см. рис. 4, 5).

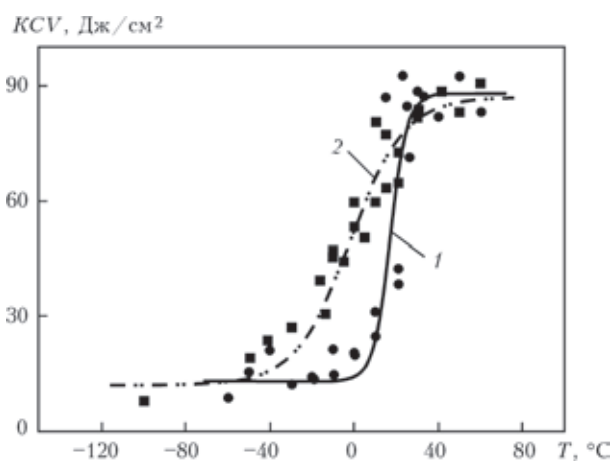


Рис. 4. Температурная зависимость ударной вязкости металла Б1: 1 — под бандажом; 2 — вне бандаж

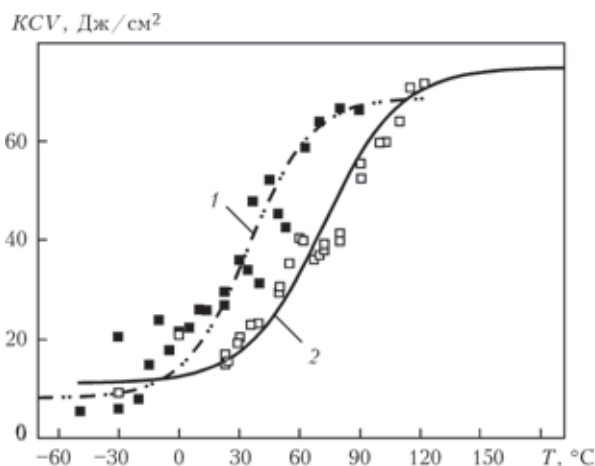


Рис. 5. Температурная зависимость ударной вязкости металла баллонов: 1 — Б2; 2 — Б3

Таблица 6. Распределение P_{hkl} по толщине стенки баллонов Б2 и Б3

hkl	Б2			Б3		
	Наружная поверхность	Середина толщины	Внутренняя поверхность	Наружная поверхность	Середина толщины	Внутренняя поверхность
110	1,56	1,48	1,60	1,36	1,44	1,51
200	1,27	1,35	1,29	1,27	1,45	1,50
211	1,18	1,08	1,11	1,00	1,12	1,02
310	0,86	0,91	0,86	1,00	1,00	0,92
222	0,87	1,13	0,86	1,00	1,00	0,89
321	0,85	0,80	0,85	0,86	0,86	0,82



Энергия зарождения разрушения при прочих одинаковых условиях определяется характером микроструктуры и температурой. В связи с особенностями сложнапряженного состояния в вершине надреза, разрушение под надрезом в основном начинается вязко даже при отрицательных температурах. Поверхность излома в этой зоне имеет ямочное (чашечное) строение в результате роста микропор и их коалесценции (рис. 6, а, б). Различия же определяется протяженностью зоны «утяжки» под надрезом. Чем длиннее этот участок, тем выше общий уровень ударной вязкости.

Сравнение протяженности вязкой зоны в исследованных изломах ударных образцов в зависимости от температуры испытаний (рис. 7) свидетельствует о том, что размер этой зоны в металле Б2 после +40 °С резко увеличивается по сравнению с Б3. Дальнейшие исследования изломов ударных образцов показали, что при низких температурах испытаний металл Б2 разрушается по механизму квазискола (рис. 6, в). Размер фасеток разрушения составляет 10...30 мкм. Отсутствуют вторичные трещины и явно выраженные очаги разрушения. В изломе наблюдается элементы пластического разрушения: «жгуты», перемины и отдельные вязкие ямки. С увеличением температуры испытания доля вязкой составляющей в квазисколе растет (см. табл. 7). В отличие от этого металл Б3 при низких температурах разрушается по механизму транскристаллитного скола

с ярко выраженным ручейстым изломом (рис. 6, з). Размер фасеток хрупкого разрушения составляет 50...80 мкм. Наблюдаются вторичные трещины по границам зерен. Доля вязкой составляющей незначительна — изменяется от 10 % при -30 °С до 15 % при +100 °С.

Таким образом, фрактографический анализ изломов в сочетании с металлографическим анализом микроструктуры и кристаллографическим анализом текстуры позволяет объяснить характер изменения температурной зависимости ударной вязкости металла. Так, более высокое сопротивление разрушению металла Б2 по сравнению с металлом Б3 в диапазоне температур вязко-хрупкого перехода связано, прежде всего, с более мелкозернистой структурой металла Б2 (10...30 мкм) по сравнению с Б3 (50...80 мкм) и разным фазовым составом в пределах указанных зерен. В связи с этим, разрушение Б2 и Б3 проходит по различным механизмам: в Б2 мелкозернистая микроструктура способствует развитию квазискола, а в Б3 крупнозернистая феррито-перлитная структура — развитию хрупкого скола. При этом в Б2 по сравнению с Б3 для зарождения микротрещин необходима большая энергия, и, как следствие, в Б2 протяженность вязкой зоны под надрезом (зона вязкого подрастания трещины) выше, чем в Б3.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что сталь Дс в баллонах разного качества. Особенно это проявляется при воздействии пластичес-

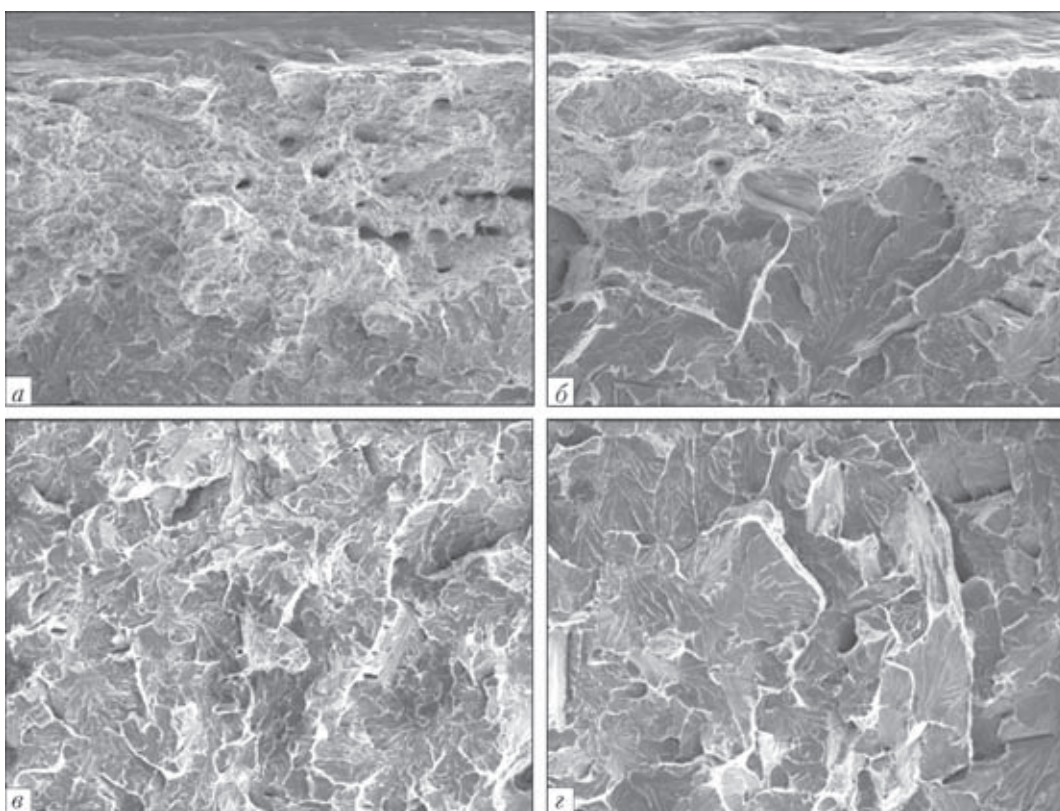


Рис. 6. Фрактографический ($\times 200$) анализ ударных образцов: а — вязкая зона под надрезом в Б2 при 40 °С; б — в Б3 при 50 °С; в — характер разрушения образцов на нижнем шельфе Б2 при -20 °С; з — Б3 при -30 °С



Таблица 7. Фрактографический анализ изломов ударных образцов Б1

Температура испытаний, °С	-50	-20	0	+20	+40	+65
Доля вязкой/хрупкой составляющей, %	16/84	20/80	25/75	37/63	70/30	95/5

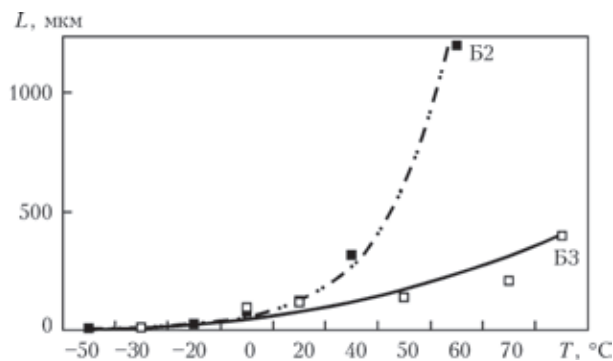


Рис. 7. Размер пластической зоны под надрезом: для Б2 $y = 2,2591e^{0,8004x}$, $R = 0,9925$; для Б3 $y = 1,625e^{0,8004x}$, $R = 0,8909$

кой деформации. Причина, по-видимому, заключается в технологии получения стали. Поэтому для улучшения физико-механических характеристик стали Дс, в том числе повышения сопротивления хрупкому разрушению, целесообразно обратить внимание на совершенствование технологического процесса ее изготовления.

Выводы

Обнаружено, что распределение коэрцитивной силы в оболочках баллонов из стали Дс в исходном состоянии неоднородно, а в ряде случаев представляет вытянутые обособленные области с повышенными показателями, достигающими в отдельных участках значений, близких к критическим (9,5 А/см). С ростом давления в баллонах и, соответственно, пластической деформации металла эти области увеличиваются и являются местом последующего разрушения. Рост пластической деформации сопровождается адекватным изменением коэрцитивной силы.

Определено, что по толщине стенки баллонов структурно-текстурные параметры распределяются неравномерно. Так, в Б1 до гидроиспытаний полюсная плотность P_{001} плоскостей скола {001} с внутренней поверхности на 11,5 % больше, чем с наружной. В результате пластической деформации при гидроиспытаниях произошло увеличение полюсной плотности P_{001} как с внутренней поверхности, так и с наружной, что практически привело к выравниванию «опасной» составляющей по толщине стенки. Наличие в текстуре металла баллонов компонент текстуры сдвига {110} <001> подавляет склонность металла хрупкому разрушению за счет вязкой компоненты P_{110} .

Установлено, что в диапазоне температур вязко-хрупкого перехода протяженность зоны вязкого подрастания трещины у металла с мелкозернистой (10...30 мкм) структурой больше по сравнению с крупнозернистым (50...80 мкм) металлом. При этом мелкозернистая структура, способствуя развитию квазисколы, оказывает более высокое сопротивление разрушению.

Показано что решающим фактором для безопасной эксплуатации баллонов является их техническое состояние, а не срок службы. Отмечена необходимость повышения физико-механических характеристик стали за счет улучшения технологии ее изготовления.

1. *Магнитный контроль и структурно-текстурные особенности металла кислородных баллонов* / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 1. — С. 7–12.
2. *Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением* / Б. Е. Попов, Е. А. Левин, В. С. Котельников и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 3. — С. 25–30.
3. *Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов* / В. М. Долинский, В. М. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
4. *Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали* / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 10. — С. 19–24.
5. *Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений* / Б. Е. Попов, В. С. Котельников, А. В. Зарудный и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 2. — С. 44–49.
6. *Бородкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах*. — М.: Металлургия, 1982. — 272 с.
7. *Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ*. — М.: Металлургия, 1970. — 366 с.
8. *Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности* / В. В. Харченко, Е. А. Кондраков, В. Н. Жмака, А. А. Бабуцкий // Надежность и долговечность машин и сооружений. — 2006. — № 27. — С. 121–130.
9. *Измерительное устройство для определения критериев хрупкости материалов по методу тензометрирования процесса разрушения образца ударным изгибом* / О. А. Бакши, И. О. Пинчук, А. Г. Кукин и др. // Приборы для исследования физических свойств материалов / Под ред. А. А. Смирнова. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 200–206.
10. *Баррет Ч. С., Массальский Т. Б. Структура металлов* // Пер. с англ.: в 2-х ч. — М.: Металлургия, 1984. — Ч. 2. — 344 с.
11. *Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению низколегированных малоperlитных сталей* / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С. Гиренко и др. // Изв. АН СССР. — 1990. — № 1. — С. 120–125.
12. *Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию характеристик разрушения низколегированной стали контролируемой прокатки* / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С. Гиренко и др. // Физ.-хим. механика металлов. — 1993. — № 2. — С. 47–52.
13. *Кристаллографическая текстура и механические свойства листов стали 09Г2ФБ* / Н. П. Лякишев В. Ф. Шамрай, И. В. Эгиз и др. // Металлы. — 2003. — № 4. — С. 93–100.
14. *Усов В. В., Шкатуляк Н. М. Фрактальная природа крихких зламів металу* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2005. — № 1. — С. 58–63.



15. Ясний П. В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщиностійкість. — Львів: Світ, 1998. — 292 с.
16. Белосточный А. В., Троцан А. И., Коротич И. К. Исследование металла цельнометаллических баллонов для сжатых газов, разрушившихся при эксплуатации // Вісник приазов. держ. техн. ун-ту. — 2009. — № 19. — С. 91–94.
17. Белосточный А. В., Лаухин Д. В. Исследование структурных особенностей металла цельнометаллических сосудов, работающих под давлением с целью стабилизации механических свойств // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. тр.: Стародубовские чтения. — Днепропетровск, 2005. — Вып. 32. — Ч. 1. — С. 133–135.

Поступила в редакцию
24.10.2011

II МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПОВРЕЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, МЕТОДЫ ЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ»

В процессе эксплуатации материалы конструкций накапливают различные повреждения, зависящие от вида нагрузки и условий эксплуатации (термическое, силовое, коррозионное воздействие, радиационное облучение и т. д.). Поэтому этот фактор необходимо учитывать при оптимизации физико-механических свойств материалов, повышении надежности и прогнозировании остаточного ресурса элементов конструкций. Ввиду сложности физических процессов, определяющих инициирование и развитие дефектов, актуальной является проблема разработки методологии прогнозирования состояния конструкций длительной эксплуатации и проведения соответствующих экспериментальных исследований.



С целью анализа и обобщения новейших результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов накопления поврежденности, зарождения и развития дефектов, диагностики состояния конструктивных элементов для обеспечения их надежности 20–25 сентября 2011 г. в Тернопольском национальном техническом университете им. И. Пулюя прошла II Международная научно-техническая конференция «Повреждение материалов во время эксплуатации, методы его диагностирования и прогнозирования». Для участия в конференции были приглашены представители различных научных школ теории механики разрушения, математических и экспериментальных методов исследования предельных состояний конструкций и конструктивных элементов, неразрушающего контроля и технической диагностики, физики твердого тела, материаловедения.

Особое внимание в ряде докладов уделялось вопросам зарождения и развития трещинообразных дефектов в конструкциях, работающих в условиях усталостного нагружения. В частности, исследование специалистов Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, результаты которого представил чл.-кор. НАН Украины А. Я. Красовский, затрагивают важную для Украины проблему деградации свойств стали магистральных трубопроводов после длительной эксплуатации и зарождения трещин стресс-коррозии в областях с переменным нагружением. Новые подходы в методологии оценки работоспособности конструкций, учитывающие специфику сложного усталостного нагружения, характерного, в частности, для авиационных конструкций, продемонстрировали в своих докладах чл.-кор. НАН Украины А.Е. Андрейкив и Ю. И. Пиндус.

Глубокий теоретический анализ в рамках новой методологии исследования развития трещин представлен в докладе американского специалиста в области механики разрушения М. Внука, который предложил численный критерий предельного состояния тела с трещиной в случае хрупкопластического поведения материала, в том числе в условиях развитых деформаций ползучести.

Подводя итог, необходимо отметить высокий научный уровень и бесспорную актуальность представленных докладов, хорошую работу организационного комитета, которая позволила успешно выполнить программу мероприятий и реализовать продуктивный обмен опытом и новейшими результатами исследований между участниками конференции.

А. С. Миленин, канд. техн. наук



ПРОГНОЗУВАННЯ ТИПІВ ДЕФЕКТІВ ПРИ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ОПЛАВЛЕННЯМ СТЕРЖНЬОВОЇ АРМАТУРИ ЗАЛІЗОБЕТОНУ

С. К. ФОМІЧОВ, д-р техн. наук, **Є. П. ЧВЕРТКО**, **І. О. СКАЧКОВ**, канд. техн. наук, **Я. В. СХАБОВСЬКИЙ**,
(Нац. техн. ун-т України «КПІ»), **П. М. ЧВЕРТКО**, канд. техн. наук (Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України)

Наведено результати застосування нейронних мереж для вирішення задач прогнозування типів дефектів на прикладі стикового зварювання оплавленням стержньової арматури залізобетону.

The paper gives the results of application of neural networks to solve the problem of prediction of defect types in the case of flash-butt welding of concrete reinforcing bars.

Застосування штучних нейронних мереж [1] на теперішній час є перспективним напрямом прогнозування у реальному часі утворення дефектів при зварюванні [2, 3].

При зварюванні стержньової арматури в з'єднаннях можуть виникати дефекти здебільшого з трьох причин [4]: порушення технологічних режимів зварювання, в тому числі під впливом збурень мережі живлення; порушення умов і правил експлуатації зварювального устаткування; внутрішні дефекти основного металу зварюваних деталей.

Порушення технологічних режимів зварювання у загальному випадку відбувається внаслідок дії різного роду збурень: енергетичних, кінематичних та технологічних. Результатом такої дії може стати поява значних відхилень реальних значень параметрів режиму від встановлених навіть за умови виконання усіх правил експлуатації зварювального обладнання та підготовки деталей до зварювання. Загалом можливими виявляються два варіанти перебігу процесу, які відповідно приводять до недостатнього нагрівання стержнів та до перегріву з'єднання.

У випадку недостатнього нагрівання зварюваних деталей значно знижуються пластичні властивості арматури (значною мірою цей процес виражений при зварюванні попередньо зміцнених стержнів). При осадці відбувається формування з'єднання не по всьому перерізу, що призводить до появи несучільностей на периферії. При механічних випробуваннях на розтяг відбувається крихке руйнування безпосередньо по стику або зоні термічного впливу (ЗТВ). На рис. 1 показано типове руйнування зварного з'єднання при механічних випробуваннях і макрошліф такого з'єднання.

Перегрів з'єднання призводить до зниження характеристик міцності в ЗТВ. При надмірному нагріві в зоні відбувається місцеве відпущення ме-

талу. Зразки після механічних випробувань на розтяг мають дві характерні шийки, які свідчать про знеміцнення з'єднання (рис. 2, а). Структура ЗТВ типова для перегрітих сталей такого класу (рис. 2, б). При подальшому збільшенні циклу нагрівання відбувається характерне руйнування з наявністю гарячих тріщин в площині з'єднання. Межа міцності при цьому зазвичай не перевищує 100...140 МПа.

При моніторингу якості зварних з'єднань виконується оцінювання наявності відхилень процесу оплавлення за сукупною дією збурень (тобто враховується, що деякі збурення підсилюють дію одне одного, а деякі — навпаки, компенсують). Таким чином, принципово можливою є іден-

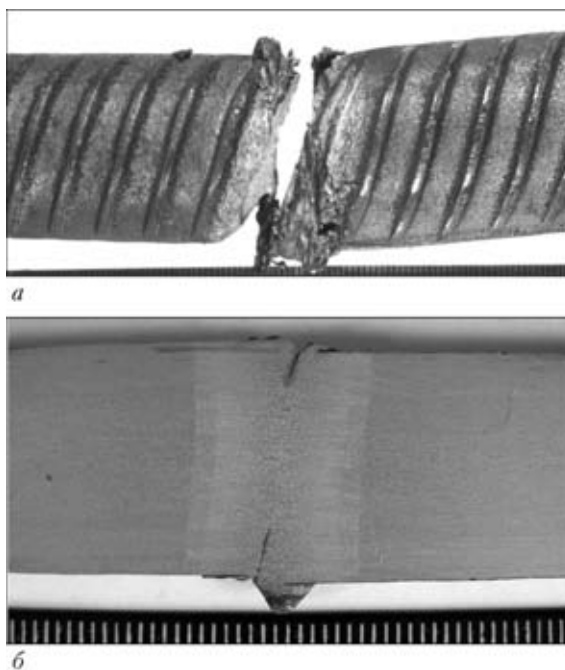


Рис. 1. З'єднання зразків, що зварені з недостатнім нагрівом: а — після механічних випробувань; б — макрошліф

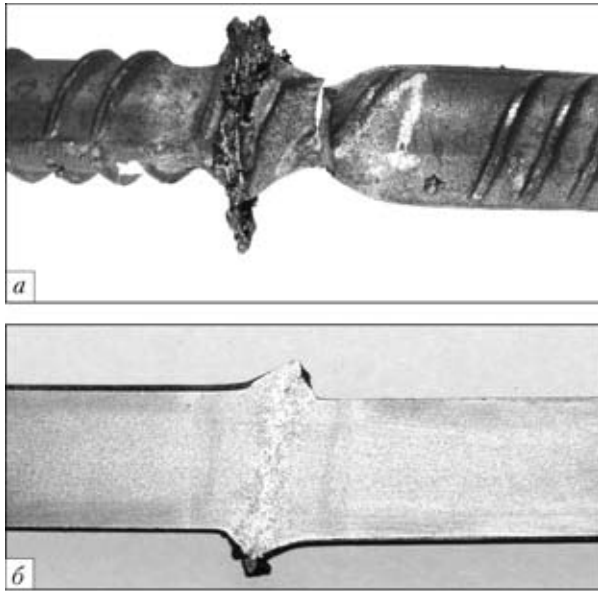


Рис. 2. З'єднання зразків, що зварені з перегрівом: а — після механічних випробувань; б — макрощліф

тифікація описаних вище процесів, які приводять до зменшення або збільшення зони нагрівання.

Порушення умов і правил експлуатації зварювального устаткування у загальному випадку приводять до зміни параметрів режиму зварювання відносно встановлених технологією значень з вини оператора установки, а також до виникнення збурень, пов'язаних із недотриманням технології підготовки деталей до зварювання.

Дія таких відхилень подібна до дії збурень, описаної вище, та приводить до виникнення подібних відхилень у процесі зварювання, тобто до утворення аналогічних дефектів у стиках. Окрім того, у ряді випадків спостерігається утворення на бічній поверхні деталей «підпалів», по яким у подальшому відбувається руйнування зразків (рис. 3). Як правило, виникнення таких дефектів відбувається при недостатньому зусиллі затискання зварюваних деталей або сильному забрудненні струмопідвідних губок внаслідок недотримання процедур технічного обслуговування обладнання. У місці нещільного прилягання деталі до електрода збільшується перехідний електричний опір до величини, що перевищує опір іскрового зазору, і починається процес локального оплавлення деталей–електрод. Як зазначено вище, «підпали», що виникають при цьому у вигляді кратерів, суттєво знижують механічні властивості зварних з'єднань. Виникненню «підпалів» також сприяє підвищений електричний опір між профільною боковою поверхнею арматури і електродом.

Ідентифікація за допомогою системи моніторингу якості зварних з'єднань порушень у ході процесу зварювання, що приводять до утворення указаних дефектів, принципово можлива. Однак вони будуть розпізнані системою за ознаками, характерними для порушень технологічних режимів

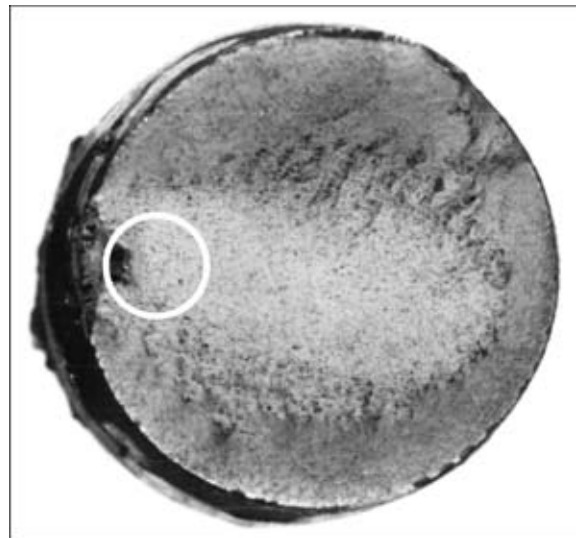


Рис. 3. Руйнування зразка арматури з дефектом бічної поверхні

зварювання. При цьому з'єднання у будь-якому випадку будуть позначені як браковані.

Внутрішні дефекти основного металу, тобто дефекти, пов'язані з виробництвом стержньової арматури, інколи спостерігаються у зварних з'єднаннях. Здебільшого це так звані закати, які утворюються безпосередньо в процесі прокатки арматури на металургійних заводах. Вони виникають, як правило, на крайових ділянках слябів або блюмсів і являють собою шар оксидів або окалини, розташований у внутрішній частині основного металу (рис. 4). Запобігти наявності таких дефектів у зварних з'єднаннях можна тільки за умови організації 100%-ного вхідного контролю якості зварюваних арматурних стержнів. Виявлення цих дефектів системою моніторингу якості зварних з'єднань практично неможливе.

Розглянемо можливість виявлення відповідних груп дефектів з метою проведення атестації технології за допомогою запропонованої методики.

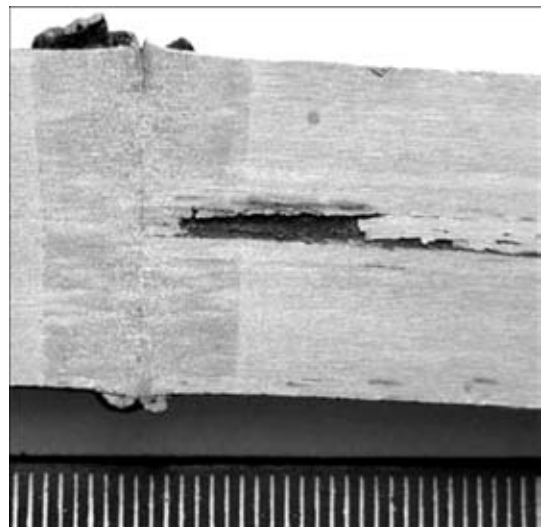


Рис. 4. Внутрішні дефекти основного металу арматури



Порушення технологічних режимів приводять до появи постійно діючих збурень за окремими параметрами. Для таких умов роботи детально розглянуто вплив відхилень параметрів режиму на показники якості з'єднань та оцінено можливість застосування для ідентифікації відхилень нейронних мереж. Оскільки система моніторингу якості зварних з'єднань виконує оцінювання наявності відхилень процесу оплавлення за сукупною дією збурень, принципово можливою є ідентифікація процесів, які

приводять до зменшення або збільшення зони нагрівання. Точність визначення відхилень при цьому становить не нижче за 87 % і деякою мірою залежить від застосованої нейронної мережі.

Порушення умов і правил експлуатації зварювального устаткування у загальному випадку приводять до зміни параметрів режиму зварювання відносно встановлених технологією значень з вини оператора установки, а також до виникнення збурень, пов'язаних із недотриманням технології

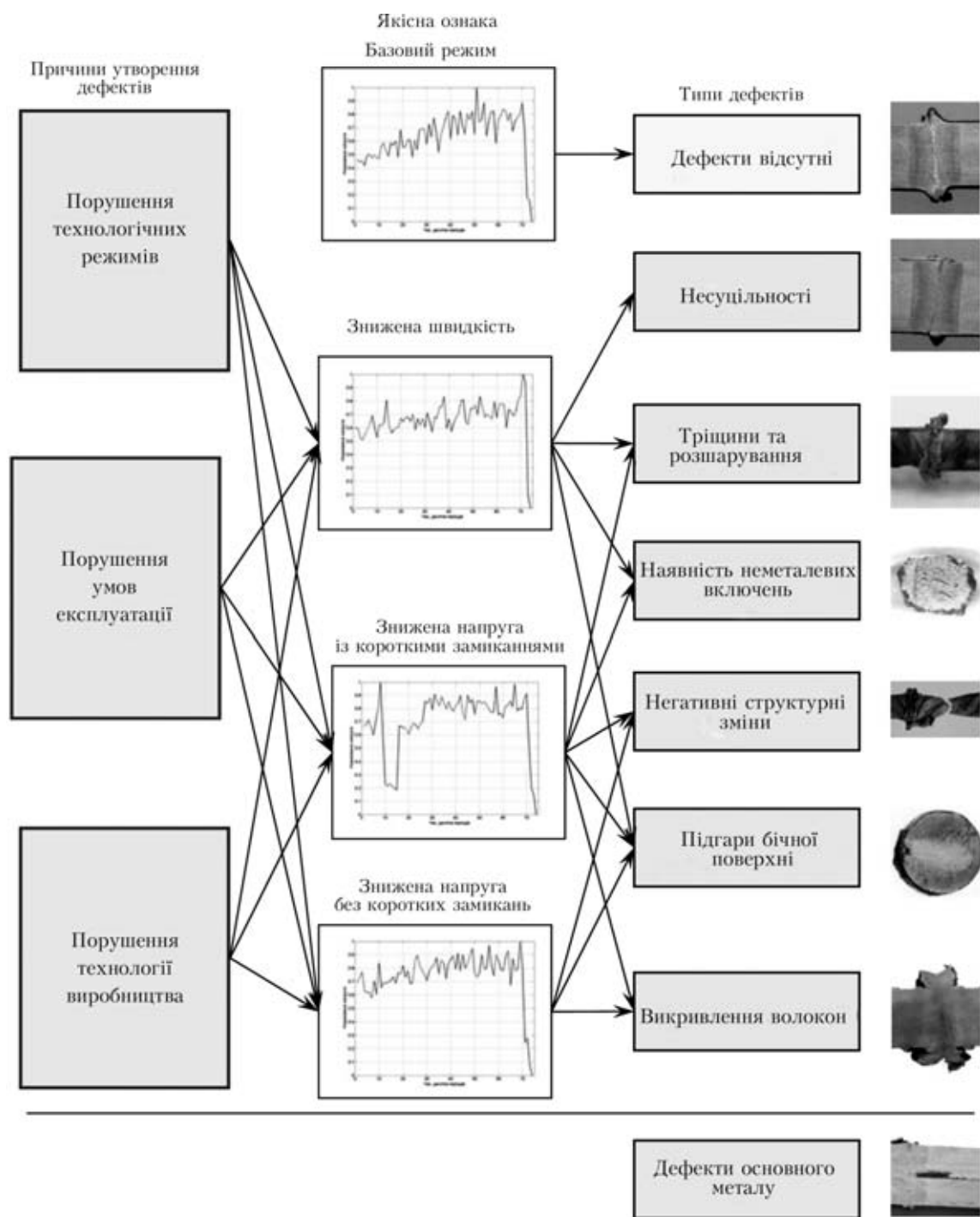


Рис. 5. Прогнозування типів дефектів у стиках стержньової арматури залізобетону із застосуванням штучних нейронних мереж (атлас дефектів)



підготовки деталей до зварювання. Оскільки дія таких порушень приводить до виникнення подібних до описаних вище відхилень у процесі зварювання, це стає причиною утворення аналогічних дефектів у стиках. Отже вони будуть розпізнані системою за ознаками, характерними для порушень технологічних режимів зварювання.

Виявлення за допомогою системи моніторингу внутрішніх дефектів основного металу, тобто дефектів, пов'язаних з виробництвом стержневої арматури, практично неможливе.

За результатами механічних випробувань встановлено, що відхиленням певних параметрів режиму відповідає поява певних дефектів у зварних з'єднаннях. Це робить можливим застосування системи моніторингу до прогнозування можливості появи тих чи інших дефектів у стиках. Узагальнену характеристику ідентифікації дефектів стиків наведено на рис. 5.

Висновки

Запропонована технологія моніторингу якості зварних з'єднань придатна до застосування при прове-

денні атестації технології зварювання разом з методами руйнуючого контролю. Технологія дає адекватні результати при роботі з машинами, у яких передбачені штучні зворотні зв'язки за енергетичними параметрами процесу зварювання, оскільки ідентифікація якості з'єднання відбувається за показниками стабільності процесу оплавлення.

1. Скачков И. О., Четвертко Е. П. Оценка стабильности процесса оплавления при контактной стыковой сварке // Автомат. сварка. — 2011. — № 3. — С. 38–40.
2. Скачков И. О., Шевченко М. В. Методика контролю якості джерел живлення для дугового зварювання із застосуванням штучних нейронних мереж // Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України «КПІ». — 2008. — № 4. — С. 115–122.
3. К вопросу применения нейронных сетей для контроля качества сварных соединений при подводной сварке / И. О. Скачков, А. Е. Пирумов, С. Ю. Максимов и др. // Автомат. сварка. — 2006. — № 6. — С. 27–31.
4. Четвертко П. М., Четвертко Е. П. Особливості контактного стикового зварювання безперервним оплавленням стержневої арматури залізобетону // Вісник Нац. ун-ту кораблебудування ім. Адмірала Макарова. — 2010. — № 4. — С. 62–69.

Надійшла до редакції
22.09.2011

ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ! Книга «Неразрушающий контроль в Украине»

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики готовит к изданию книгу «Неразрушающий контроль в Украине». В книге будет представлена справочная информация о предприятиях и организациях Украины, занимающихся исследованиями и разработками в области неразрушающего контроля, изготовлением и продажей материалов, приборов и оборудования, оказанием услуг в области технического диагностирования. Издание справочника будет способствовать обмену информацией, ускорению решения многих задач по неразрушающему контролю и технической диагностике.

Книга будет включать следующие разделы:

- Неразрушающий контроль в институтах НАН Украины
- Неразрушающий контроль в университетах
- Изготовители и поставщики средств неразрушающего контроля
- Производственные лаборатории и предприятия
- Обучение и сертификация персонала
- Испытательные лаборатории и сертификация продукции
- Стандартизация и метрология в неразрушающем контроле
- Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
- Итоги профессиональных конкурсов УО НКТД
- Конференции и выставки
- Книги, журналы, интернет

Тел.: (044) 200-46-66; тел./факс: (044) 206-01-66; e-mail: ndt@paton.kiev.ua



КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА

А. А. ДУБОВ, д-р техн. наук (ООО «Энергодиагностика», Москва, РФ)

Сварка существует более 100 лет, а самый главный фактор, определяющий надежность сварного соединения — распределение остаточных сварочных напряжений — до сих пор не контролируется из-за отсутствия методов НК, пригодных для использования в практике. В статье показана связь между параметрами собственного магнитного рассеивания и напряженным состоянием сварных соединений. Представлены критерии оценки состояния сварных соединений по результатам контроля методом магнитной памяти металла. Приведены отдельные примеры результатов контроля качества сварных соединений.

Welding has been in existence for more than 100 years, and the main factor determining welded joint reliability, namely, distribution of residual welding stresses, still cannot be controlled, because of the absence of NDT methods suitable for application in practice. A correlation is shown between the parameters of inherent magnetic dispersion and stressed state of welded joints. Criteria of assessment of the condition of welded joints by the results of control by metal magnetic memory method are presented. Some examples of the results of welded joint quality control are given.

Для объективной оценки надежности сварных соединений недостаточно выявления дефектов с определением геометрических размеров и мест их расположения. Необходима интегральная диагностика с учетом напряженно-деформированного состояния, позволяющего определить степень опасности дефектов и, в конечном итоге, достоверно оценить надежность сварного соединения и принять решение об его ремонте или замене.

В настоящее время в России разработан и успешно внедряется в различных отраслях промышленности принципиально новый метод диагностики металла изделий и сварных соединений, основанный на использовании эффекта магнитной памяти металла (МПМ).

Метод МПМ — метод НК, основанный на анализе распределения собственного магнитного поля рассеяния (СМПР), сформировавшегося естественным образом в процессе сварки. Путем считывания СМПР предоставляется уникальная возможность выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва с учетом структурной неоднородности, распределения остаточных напряжений и дефектов сварки.

Одной из важных и сложных проблем современного НК качества сварных соединений разных типов является поиск и определение в них «слабого звена» в единой комплексной системе факторов «структурно-механическая неоднородность—дефекты сварного шва—конструктивный и технологический концентратор напряжений», т. е. зон с высокой неоднородностью напряженно-деформированного состояния или зон концентрации напряжений (ЗКН). Это важно как при изготовлении сварных соединений, т. е. непосред-

ственно после сварки для оптимизации технологического процесса, так и при их эксплуатации.

Традиционная дефектоскопия, ориентированная только на поиск несплошностей в сварных соединениях, не может обеспечить достоверную оценку их качества. Кроме того, проблемными задачами традиционной дефектоскопии являются контроль угловых, тавровых, тройниковых сварных соединений, соединений контактной сварки, тонких пластин. Опираясь только на результаты дефектоскопии, технологу-сварщику трудно выявлять причины дефектности шва и совершенствовать технологию сварки.

Очень важной и актуальной проблемой является также контроль остаточных напряжений (ОН) до и после термической обработки сварных соединений, при выполнении различных технологических наплавов, контроль ОН в результате коробления.

Анализ известных методов НК остаточных напряжений сварных соединений позволяет заявить об их непригодности к широкому практическому внедрению прежде всего из-за большого объема подготовительных работ (зачистка поверхности с удалением валика шва, построение тарировочных графиков и др.).

Обобщая сказанное, можно сделать вывод, что на сегодня не существует ни одного метода и прибора НК для оперативного контроля качества сварных соединений, позволяющих без специальной подготовки поверхности определять слабое звено в единой комплексной системе «концентрация напряжений—дефект».

В этой связи метод МПМ представляет большие практические возможности прежде всего как инженерный метод экспресс-контроля качества и как метод комплексной оценки сварных соединений по магнитным полям рассеяния, возникнове-



ние которых обусловлено формированием остаточной намагниченности в процессе сварки.

Формирование магнитной (доменной) структуры в сварных соединениях происходит одновременно с кристаллизацией при остывании металла в магнитном поле Земли и прохождении через точку Кюри (для железа $\sim 768^\circ\text{C}$). На возникающих дефектах сварки образуются узлы закрепления доменных границ с выходом на поверхность сварного шва в виде СМПР. Таким образом, путем считывания СМПР, которые формируются в процессе сварки, нам предоставляется возможность выполнять интегральную оценку фактического состояния сварного шва. Одновременно с дефектоскопией предоставляется возможность выполнять оценку напряженно-деформированного состояния сварного соединения.

Контроль осуществляется с использованием специализированных приборов. На рис. 1 представлена схема контроля стыковых сварных соединений труб. Зачистки и какой-либо подготовки поверхности сварного шва не требуется. При контроле используется естественная намагниченность, сформировавшаяся в процессе сварки.

На рис. 2, *a* показано типичное распределение остаточных напряжений на сварном соединении пластин, на рис. 2, *б* — распределение тангенциальной составляющей магнитного поля рассеяния H_p^x , которое фиксируется при контроле методом МПМ. Из рисунков видна хорошая качественная сходимость этих распределений.

На рис. 3 представлены результаты измерения нормальной составляющей поля H_p , характеризующей распределение остаточных напряжений и деформаций после сварки двух одинаковых пластин. Пластины в процессе сварки были свободны и прогнулись немного вверх. Распределение поля H_p в рассматриваемом случае наглядно показывает влияние геометрических размеров пластин и их коробления на уровень и характер распределения остаточных сварочных деформаций и напряжений.

На рис. 4, *a* показано распределение поля H_p на сварном соединении трубы, зафиксированное в ЗТВ шва, на рис. 4, *б* — распределение остаточных напряжений, измеренное на сварном шве рентгеновским дифрактометром в этих же зонах.

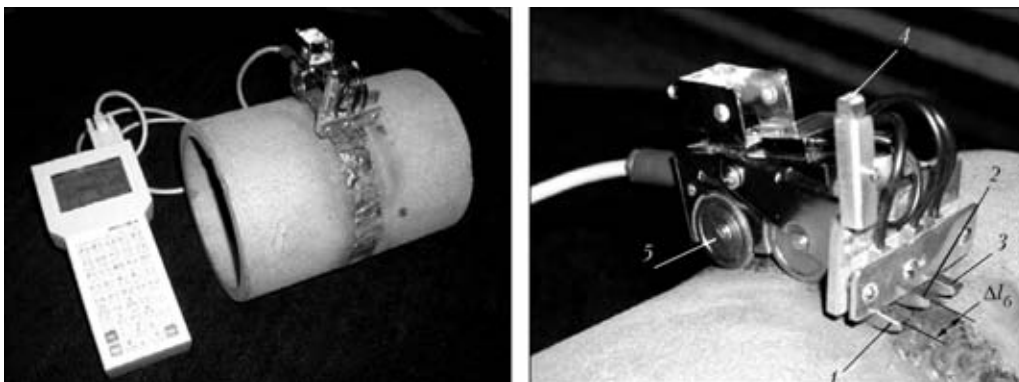


Рис. 1. Контроль стыковых сварных соединений труб четырехканальным датчиком прибора ИКН-1М-4: 1–3 — феррозондовые преобразователи сканирующего устройства для регистрации поля H_p на поверхности сварного шва; 4 — феррозондовый преобразователь для отстройки от внешнего магнитного поля H_p ; 5 — колеса привода измерителя длины; ΔL_6 — базовое расстояние между феррозондовыми преобразователями

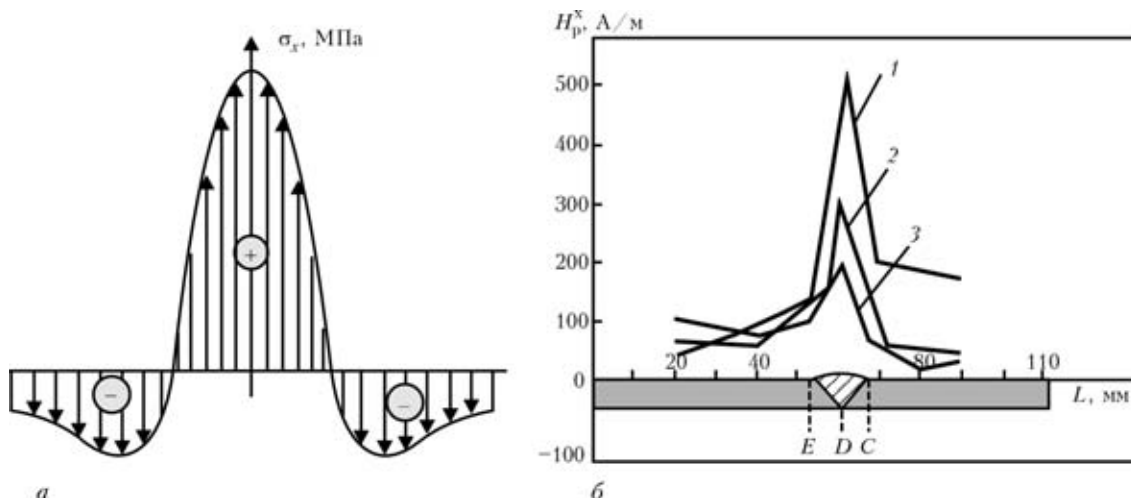


Рис. 2. Типичное распределение остаточных напряжений на сварном шве пластины (*a*); распределение поля H_p^x перпендикулярно сварному шву пластины (*б*): 1–3 — разные сечения пластины; EC — зона термического влияния; D — центр шва



На рис. 5 представлены результаты контроля участка сварного стыка паропровода (диаметром 273×32, 12Х1МФ) с применением метода МПМ и анализа макроструктуры шлифа.

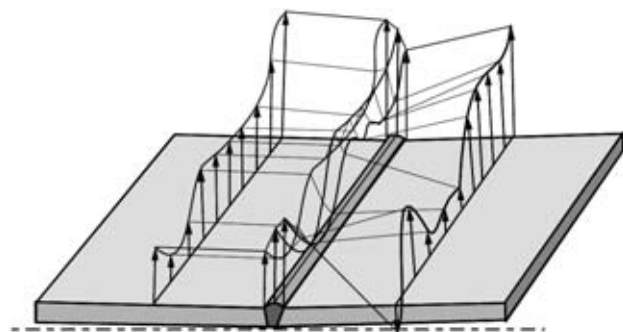
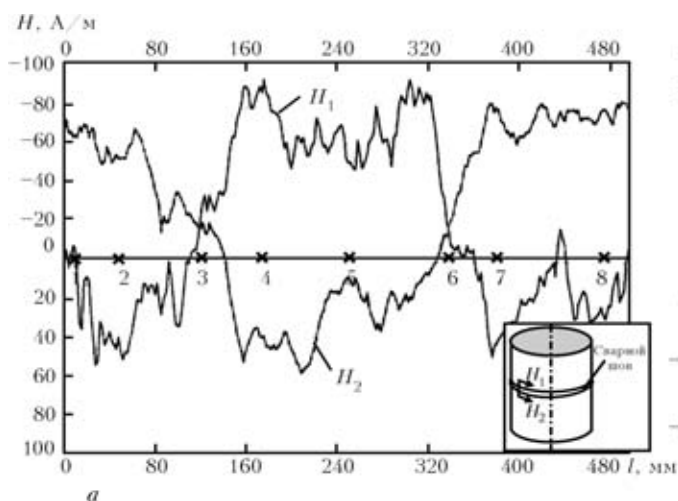


Рис. 3. Результаты измерения нормальной составляющей поля H_p , характеризующей распределение остаточных напряжений и деформаций после сварки двух одинаковых пластин



Рассмотрим далее возможности метода МПМ при контроле контактной сварки.

В мировом опыте НК до сих пор не решена проблема контроля качества контактной точечной сварки соединений различных узлов оборудования. Эта проблема особенно актуальна для серийного или массового производства и при сварке особо ответственных элементов. В этих условиях, когда на надежность соединений контактной сварки влияет множество факторов, необходим метод НК, который бы интегрально оценивал состояние металла сварного соединения.

В 2001 г. ООО «Энергодиагностика» и южнокорейской фирмой LG разработаны способ и устройство для контроля контактной сварки клапана с поршнем с использованием метода МПМ.

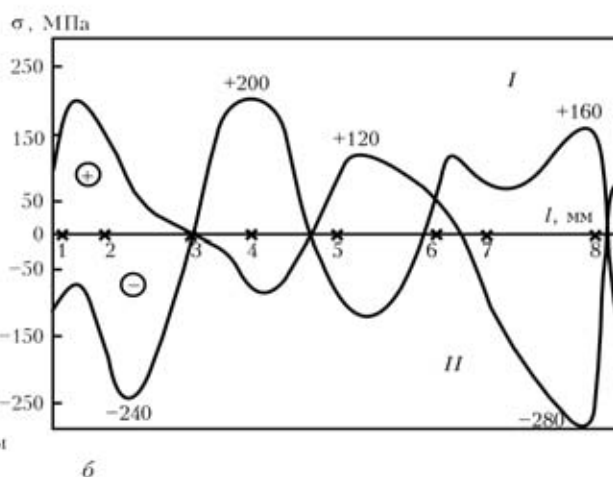


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние сварного соединения трубы (диаметром 160×8мм, Ст3) по результатам контроля: а — методом МПМ: H_1 и H_2 — распределение напряженности магнитного поля H_p соответственно по первому и второму каналу измерений; б — рентгеновским дифрактометром: 1–8 — точки измерения напряжений рентгеновским дифрактометром симметрично с двух сторон шва по ЗТВ; I, II — результаты измерений напряжений, соответствующие полю H_1 и H_2

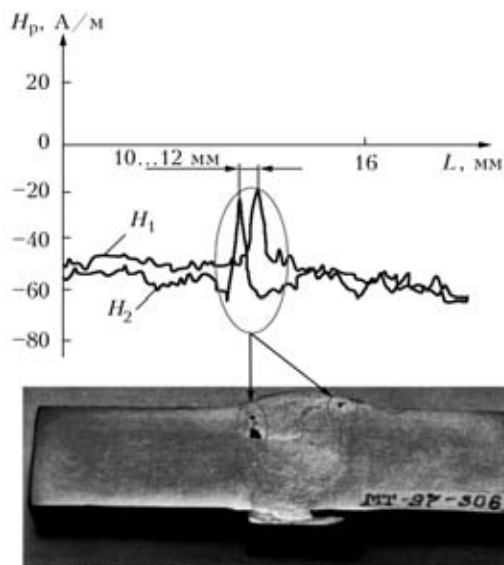


Рис. 5. Результаты контроля участка сварного стыка паропровода (диаметром 273×32, 12Х1МФ) с применением метода МПМ и анализа макроструктуры шлифа

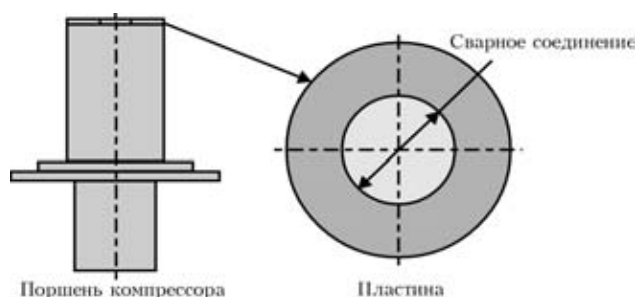


Рис. 6. Общий вид поршня и клапана в виде пластины



При оптимальном качестве сварки обеспечивается сварное соединение поршня диаметром 4,5 мм и шириной шва не более 0,5 мм. Контактная сварка выполняется электродом конической формы с использованием инверторного режима сварки. Общий вид поршня и клапана приведен на рис. 6. Клапан выполнен в виде тонкой пластины толщиной 0,3 мм.

На рис. 7 представлены результаты контроля методом МПМ кольцевого сварного соединения контактной сварки клапана с поршнем, используемым в компрессорном производстве.

Эпюры распределения магнитного поля H_p , измеренные вдоль периметра сварного шва, характеризуют недогрев металла (рис. 7, а), перегрев (рис. 7, б) и оптимальное качество сварки (рис. 7, в).

Для решения задачи по выявлению оптимального качества сварки клапана с поршнем разработаны специализированный датчик и алгоритм обработки результатов контроля.

Критерии отбраковки по методу МПМ в ходе выполнения экспериментальных работ подтверждались разрушением образцов при испытаниях на циклическую прочность и металлографическим исследованием.

В таблице приведены результаты сравнительных испытаний промышленных образцов методом МПМ и на циклическую прочность ($K_{ср}$ — среднее значение градиента магнитного поля, рас-

считанное по результатам измерений поля на сварном соединении и в центре пластины).

Испытания на циклическую прочность сварного соединения выполнялись на специальной установке, имитирующей работу клапана. Качественное (оптимальное) сплавление клапана и поршня должно было выдержать 10^8 циклов нагрузок. Этому значению циклов нагрузки стабильно соответствовало значение $K_{ср} = 20...21 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$.

В этих сравнительных экспериментах была достигнута эффективность контроля 96 %.

На первом этапе контроль качества контактной сварки выполнялся с использованием метода МПМ и специализированного датчика в «ручном» варианте, на втором были разработаны критерии отбраковки, специализированный программный продукт и установка по контролю контактной сварки поршней с клапанами.

На рис. 8 приведены результаты классификации качества сварки клапана и поршня по значению коэффициента $K_{ср}$ (выделена область, соответствующая оптимальному качеству сварки). Обработка результатов контроля, представленных на рис. 8, выполнена с использованием программного продукта.

На рис. 9 представлена схема контроля поршней с использованием специализированного датчика и приборно-компьютерного комплекса. Отбраковка поршней по качеству контактной сварки

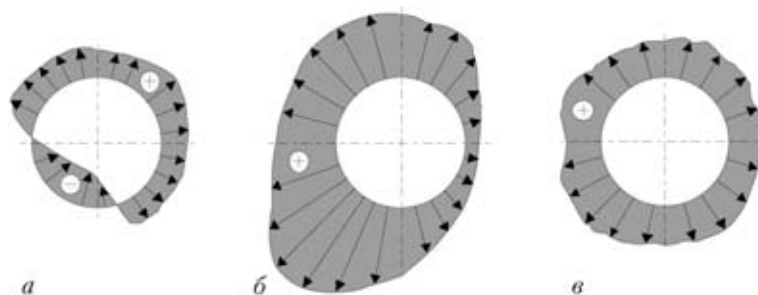


Рис. 7. Эпюры распределения магнитного поля H_p вдоль кольцевого сварного соединения контактной сварки клапана с поршнем: а — недогрев металла; б — перегрев; в — оптимальное качество сварки

Сравнение результатов контроля сварки методом МПМ и результатов испытаний поршней на циклическую прочность

Непровар (несплавление)			Качественное сплавление (норма)			Перегрев металла		
Номер поршня	$K_{ср}$	Результаты испытаний	Номер поршня	$K_{ср}$	Результаты испытаний	Номер поршня	$K_{ср}$	Результаты испытаний
4	16,0	$6,3 \times 10^6$	1	20,0	$9,87 \times 10^7$	2	25,0	$6,8 \times 10^6$
18	10,0	$1,9 \times 10^7$	9	21,0	$1,27 \times 10^8$	3	18,0	$1,03 \times 10^7$
20	12,0	$3,5 \times 10^7$	10	20,0	$1,5 \times 10^8$	5	28,0	$6,5 \times 10^6$
21	10,0	$3,7 \times 10^7$	11	20,0	$1,08 \times 10^8$	6	24,0	$3,9 \times 10^6$
22	14,0	$1,2 \times 10^7$	12	21,0	$9,98 \times 10^7$	7	25,0	$4,5 \times 10^6$
23	11,0	$3,6 \times 10^7$	13	22,0	$1,7 \times 10^8$	8	25,0	$6,7 \times 10^6$
24	16,0	$3,9 \times 10^7$	14	20,0	$9,8 \times 10^7$	17	33,0	$1,07 \times 10^7$
25	17,0	$1,89 \times 10^7$	15	21,0	$1,3 \times 10^8$	-	-	-
-	-	-	16	21,0	$1,18 \times 10^8$	-	-	-
-	-	-	19	20,0	$1,29 \times 10^8$	-	-	-

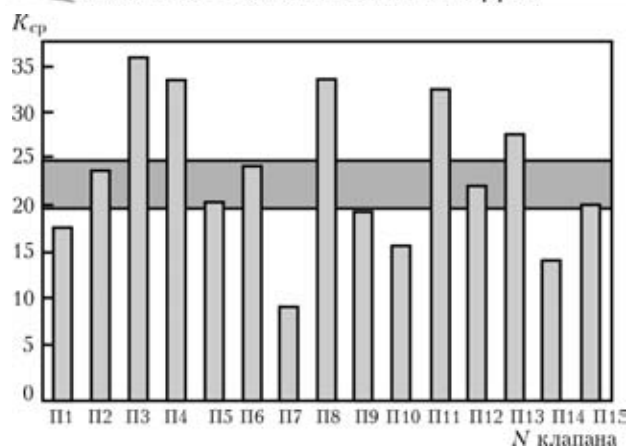


Рис. 8. Классификация качества сварки клапана и поршня

в этой схеме может осуществляться автоматический при движении поршней в поточной линии в соответствии с магнитными критериями, полученными в ходе экспериментальных исследований.

В технологии контактной сварки широко применяется робототехника, а в НК до сих пор применяется выборочная проверка отдельных точек сварки путем удара на отрыв.

Представленный пример решения задачи контроля поршней для фирмы LG наглядно демонстрирует потенциальные возможности метода МПМ и соответствующих приборов. Возможна организация автоматического контроля с использованием роботов. На первом этапе метод МПМ можно использовать для отработки технологии контактной сварки и периодической проверки отклонений этой технологии от нормы.

В настоящее время в энергетике, нефтехимии, газпроме и в других отраслях промышленности России на основе метода МПМ разработаны и применяются на практике более 40 руководящих документов Ростехнадзора.

В 2010 г. на основе международных стандартов ИСО по методу МПМ Росстандартом на территории России введены в действие стандарты [1–3].



Рис. 9. Схема контроля поршней с использованием специализированного датчика и приборно-компьютерного комплекса

Аналогичные национальные стандарты по методу МПМ на базе международных стандартов ИСО введены в действие в Польше, Украине, Китае, Монголии. Метод МПМ и соответствующие приборы контроля используются более чем на 1000 предприятиях России. Кроме России метод опробован и внедрен на отдельных предприятиях в 30 странах мира.

В Москве, начиная с 1996 г., действует российский и международный центр подготовки специалистов по методу МПМ (независимый орган по аттестации персонала в области НК НОАП НК ООО «Энергодиагностика»).

В 2010 г. экспертным советом Ростехнадзора метод МПМ включен в перечень основных магнитных методов НК, рекомендуемых к применению на опасных производственных объектах.

1. ГОСТ Р ИСО 24497-1-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 1. Термины и определения.
2. ГОСТ Р ИСО 24497-2-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 2. Общие требования.
3. ГОСТ Р ИСО 24497-3-2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 3. Контроль сварных соединений.

Поступила в редакцию
29.07.2011



РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРОВ АЭС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

В. А. ПУХЛИЙ, д-р техн. наук, **К. Н. МАЛОВИК**, инж. (Севастопольский ин-т ядерной энергетики и промышленности)

Разработана методика определения прочности и ресурса центробежных и осевых насосов ядерной энергетики на основе теории оболочек при воздействии высокотемпературных и радиационных полей.

A procedure is developed for determination of strength and residual life of centrifugal and axial-flow pumps for nuclear engineering based on the theory of shells at the impact of high-temperature and radiation fields

Методика определения прочности и ресурса центробежных и осевых насосов ядерной энергетики на основе теории оболочек с учетом напряженно-деформированного состояния (НДС) и коррозионно-эрозионного износа изложена в работах [1, 2]. Как отмечалось в работе [1], трубопроводы и оборудование реакторов АЭС работают в условиях сложного нагружения, обусловленного прежде всего воздействием НДС, агрессивных сред, высокотемпературного нагрева, радиационного облучения [3–5].

Так, главный насос типа ГЦН-195М, обеспечивающий циркуляцию теплоносителя через реактор ВВЭР-1000 и передачу тепла в парогенератор, работает при температуре теплоносителя $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. в условиях высокотемпературного нагрева.

Кроме того, элементы рабочих колес центробежных и осевых насосов подвергаются радиационному облучению.

В разрабатываемых реакторах будущего в качестве теплоносителя используется вода при сверхкритических параметрах, жидкий гелий, а также жидкометаллические теплоносители, жидкосолевые теплоносители. Температура теплоносителей в этих реакторах достигает $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Очевидно, что при расчетах прочности и ресурса центробежных насосов необходимо учитывать изменение физико-механических характеристик материала: модуля упругости E и коэффициента линейного расширения α от температуры:

$$E(T) = E(x, y, z); \alpha(T) = \alpha(x, y, z). \quad (1)$$

В результате тепловые напряжения сами по себе и в сочетании с механическими напряжениями от центробежной нагрузки, радиационного облучения могут вызвать разрушение рабочих колес центробежных и осевых насосов, т. е. отказы насосов [3–5].

Воздействие радиационного поля на оборудование реакторов АЭС. Радиационное облучение твердых тел сопровождается многочисленными эффектами, в результате которых возникает дополнительная объемная деформация Q_I , изменяются упругие и пластические характеристики материала.

Оценим влияние нейтронного облучения НДС на состояние элементов конструкций. Рассмотрим однородное изотропное тело, занимающее полупространство $z \geq 0$. Если на границе тела ($z = 0$) параллельно оси z излучаются нейтроны с одинаковой средней энергией и интенсивностью Φ_0 [нейтрон / ($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)], то интенсивность потока нейтронов, доходящих до плоскости $z = \text{const}$ определяется следующим образом [6]:

$$\Phi(z) = \Phi_0 e^{-\mu z}. \quad (2)$$

Величина μ называется *макроскопическим эффективным сечением*. Для любого химического элемента можно записать:

$$\mu = \sigma n_0 = \sigma \frac{A_0 \rho}{A}, \text{ см}^{-1}. \quad (3)$$

Здесь σ — эффективное сечение, отнесенное к одному ядру; n_0 — число ядер в 1 см^3 ; A_0 — число Авогадро; A — атомный вес; ρ — плотность.

В стационарном случае, учитывая выражение (2), к моменту времени t через сечение z пройдет интегральный поток:

$$I(z) = \Phi_0 t e^{-\mu z}. \quad (4)$$

Таким образом можно принять, что изменение объема вещества прямо пропорционально интегральному потоку $I(z)$:

$$Q_I = B I(z), \quad (5)$$

где B — постоянный коэффициент, полученный экспериментально.



Величина $I_0 = \phi_0 t$ дает суммарный поток нейтронов на единицу площади поверхности тела. Следует отметить, что в ядерных реакторах ϕ_0 имеет порядок $10^{17} \dots 10^{18}$ нейтрон/(м²·с), а I_0 достигает значений $10^{23} \dots 10^{27}$ нейтрон/м².

При этом объемная деформация QI достигает значения 0,1. Следовательно, в зависимости от энергии нейтронов и облучаемого материала величина B может иметь порядок $10^{-28} \dots 10^{-24}$ м²/нейтрон.

Следует подчеркнуть, что зависимость модуля упругости E , пределов текучести σ_T , прочности и всей диаграммы растяжения от интегрального потока I_0 различных энергий исследована экспериментально после облучения образцов в ядерных реакторах. Отмечено, что модуль упругости E при облучении возрастает до 5 %. Пределы текучести и прочности материалов также возрастают при радиационном облучении.

Таким образом, по своему воздействию на упругие конструкции радиационное облучение противоположно тепловому воздействию, которое уменьшает предел текучести материала и другие характеристики.

Для аналитического описания радиационного упрочнения предела текучести материала используется следующая формула:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \{1 + A [1 - \exp(-\xi I)]^{1/2}\}. \quad (6)$$

Здесь σ_T , σ_T^0 — предел текучести облученного и необлученного материалов; A , ξ — константы материала, определяемые экспериментально.

Что касается влияния радиационного облучения на ползучесть материалов, то первые сведения были получены при испытании урана в ядерном реакторе. Увеличивающееся при облучении количество точечных дефектов способствует ускорению ползучести урана в 50...100 раз, несмотря на то, что радиационное упрочнение материала приводит к уменьшению скорости движения дислокаций.

На рис. 1 приведены кривые ползучести циркониевого сплава циркалой-2 [7].

Напряжение во время испытаний составляло 140 МПа, температура $T = 573$ К.

Следует отметить, что наряду с процессом ускоренной ползучести при воздействии радиационного облучения наблюдается также ускоренная релаксация напряжений.

Таким образом, при решении краевой задачи по расчету термоупругих элементов центробежных насосов ядерной энергетики будут использоваться известные зависимости модуля упругости E от температуры, в которых должно быть учтено радиационное упрочнение физико-механических характеристик материала.

Отметим, что в условиях радиационного облучения материала повышается коррозионная и эрозионная стойкость материала конструктивных элементов центробежных насосов вследствие радиационного упрочнения предела текучести материала σ_T .

Ресурс насосов при воздействии высокотемпературных радиационных полей. Определим прочность и ресурс центробежных насосов при воздействии высокотемпературных радиационных полей. За наиболее напряженный элемент насоса примем рабочую лопатку.

Напряженно-деформированное состояние рабочей лопатки центробежного насоса (рис. 2) описывается системой линейных дифференциальных уравнений термоупругости пологих оболочек смешанного типа относительно нормального перемещения $W(x, y)$ и функции напряжений $F(x, y)$ [2]:

$$\begin{aligned} D \nabla^4 w + 2 \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 w + 2 \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 w + \nabla^2 D \nabla^2 w - \\ - (1 - \nu) L(D, w) = \\ = h \nabla_k^2 F + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_1 \right) U - p_1 \frac{\partial w}{\partial x} - \nabla^2 M_T + q(x, y); \quad (7) \\ \frac{1}{B} \nabla^4 F + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{B} \right) \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 F + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{B} \right) \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 F + \nabla^2 \left(\frac{1}{B} \right) \times \\ \times \nabla^2 F - (1 + \nu) L \left(F, \frac{1}{B} \right) = \\ = -(1 - \nu^2) \frac{1}{h} \nabla_k^2 w - \frac{1 - \nu}{h} \nabla^2 \left(\frac{M_T}{B} \right) - \frac{1 - \nu}{h} \times \\ \times \left[\frac{1}{B} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{B} \right) \frac{\partial U}{\partial x} + \nabla^2 \left(\frac{1}{B} \right) U \right], \end{aligned}$$

где R и h — радиус срединной поверхности лопатки и ее толщина; M_T — температурный момент, q и $p_1 = \frac{\partial U}{\partial x}$ — нормальная и тангенциальные

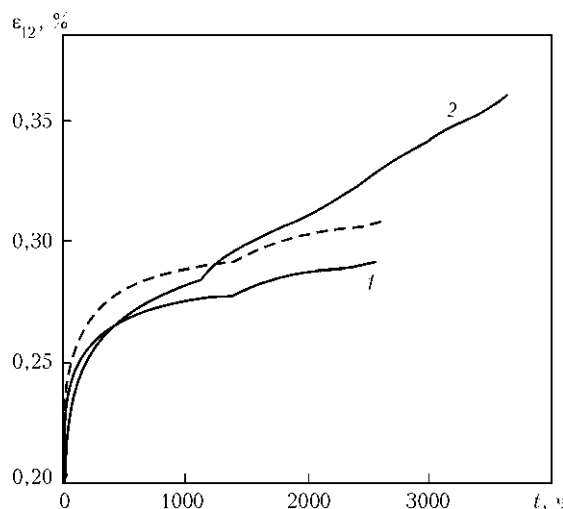


Рис. 1. Ползучесть циркониевого сплава циркалой-2: 1 — процесс без облучения; 2 — при облучении в реакторе с интенсивностью $\phi_0 = 5 \cdot 10^{16}$ нейтрон/(м²·с); штриховая линия соответствует расчету

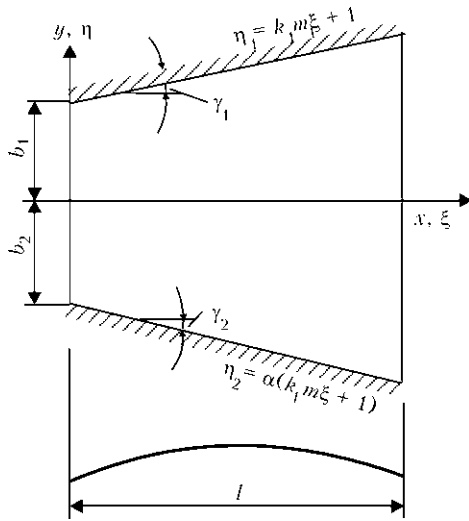


Рис. 2. Конфигурация и система координат рабочей лопатки центробежного насоса

компоненты центробежной силы элемента лопатки, отнесенные к единице площади срединной поверхности лопатки [8]:

$$q = \frac{\gamma \omega^2}{g} h R_2 \cos \beta_2; p_1 = \frac{\gamma \omega^2}{g} h (R_2 \sin \beta_2 - x). \quad (8)$$

Тангенциальная нагрузка имеет потенциал:

$$U = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} \omega^2 h (R_2 \sin \beta_2 - x)^2. \quad (9)$$

В уравнениях (7) величины B , D , N_T и M_T определяются следующим образом:

$$B(x, y) = \frac{1}{1 - \nu^2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(T) dz, \quad (10)$$

$$N_T(x, y) = \frac{1}{1 - \nu} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(T) \alpha(T) T(x, y, z) dz,$$

$$D(x, y) = \frac{1}{1 - \nu^2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(T) (z - z_0)^2 dz, \quad (11)$$

$$M_T(x, y) = \frac{1}{1 - \nu} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(T) \alpha(T) T(x, y, z) (z - z_0) dz,$$

где z_0 — ордината поверхности приведения относительно срединной поверхности оболочки.

Граничные условия на краях лопатки, прилегающих к диску, соответствуют свободно защемленному краю [8]:

$$w = w_{,n} = F = F_{,n} = 0. \quad (12)$$

Граничные условия по входной и выходной кромкам лопатки соответствуют свободному краю. В этом случае:

$$N_x = N_{xy} = M_x = 0, Q_x - \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = 0. \quad (13)$$

Итак, нами сформулирована задача термоупругости для цилиндрической лопатки центробежного насоса, основанная на интегрировании системы уравнений (7) и граничных условиях (12)–(13).

Введем безразмерную систему координат:

$$\xi = \frac{x}{l}, \eta = \frac{y}{b_1}, \beta = \frac{z_1}{h}, z_1 = z - z_0 \quad (14)$$

и безразмерные функции:

$$\bar{w} = \frac{w}{h}, \bar{F} = \frac{F}{E^* h^2}. \quad (15)$$

Здесь E^* — модуль упругости материала при температуре $T = 20^\circ \text{C}$.

Силовые факторы в безразмерных координатах запишутся так:

$$\begin{aligned} M_\xi &= \frac{M_x l^2}{D_1 h} = -(\bar{w}_{,11} + \nu m^2 \bar{w}_{,22}) - \frac{M_{T_1} l}{D_1 h}, \\ M_\eta &= \frac{M_y l^2}{D_1 h} = -(m^2 \bar{w}_{,22} + \nu \bar{w}_{,11}) - \frac{M_{T_1} l^2}{D_1 h}, \\ M_{\xi\eta} &= \frac{M_{xy} l^2}{D_1 h} = -(1 - \nu) m \bar{w}_{,12}. \end{aligned} \quad (16)$$

В этих выражениях $m = l/b_1$ — геометрический параметр лопатки.

Здесь и в дальнейшем нижний индекс i , следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате x_i , при этом $i = 1$ соответствует дифференцированию по ξ , а $i = 2$ — по η .

Величины D_1 и M_{T_1} определяются следующим образом:

$$D_1 = h^3 \int_{-\left(\frac{1}{2} + \frac{z_0}{h}\right)}^{\frac{1}{2} - \frac{z_0}{h}} \frac{E}{1 - \nu^2} \beta^2 d\beta, \quad M_{T_1} = h^2 \int_{-\left(\frac{1}{2} + \frac{z_0}{h}\right)}^{\frac{1}{2} - \frac{z_0}{h}} \frac{\alpha E T}{1 - \nu} \beta d\beta. \quad (17)$$

Модуль упругости E , температура T и коэффициент линейного удлинения α должны быть выражены через переменную новой системы координат β .

Температурное поле представим в виде:

$$T(\xi, \eta, \beta) = T(\beta) f(\xi, \eta), \quad (18)$$

где $T(\beta)$ — функция изменения температуры по толщине лопатки; $f(\xi, \eta)$ — безразмерная функция изменения температуры в срединной поверхности лопатки.

Рассмотрим температурное поле вида (рис. 3, а):



$$T = T_0^* + \beta \Delta T, \quad T_0^* = T_0 + \frac{z_0 \Delta T}{h}, \quad T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2}, \quad (19)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2.$$

В дальнейшем будем рассматривать линейный закон распределения температуры по толщине лопатки (19), однако все выводы могут быть распространены и на нелинейные законы, например, квадратичный (рис. 3, б):

$$T = \Delta T \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h} \right)^2. \quad (20)$$

Закон (19) соответствует стационарному режиму теплопроводности, а (20) является частным случаем нестационарного режима.

На рис. 4 приводятся зависимости модуля упругости E и коэффициента линейного удлинения α от температуры для жаростойкой стали Х14Г14НЗТ. Здесь кривая E соответствует только воздействию температурного поля, а кривая E^p

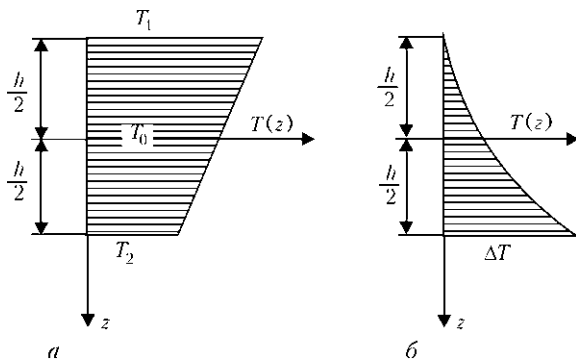


Рис. 3. Линейный и нелинейный законы распределения температуры по толщине лопатки

$$\alpha \cdot 10^6, \text{ град}^{-1} \\ E \cdot 10^4, \text{ кгс/мм}^2$$

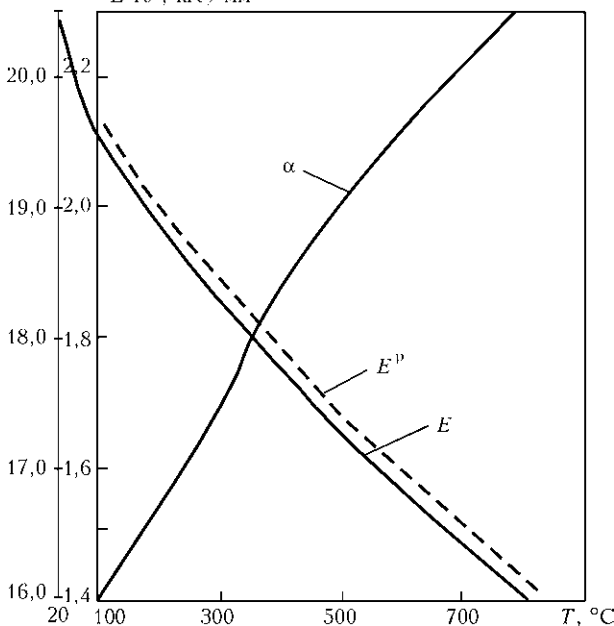


Рис. 4. Зависимость E и α от температуры и радиационного облучения для стали Х14Г14НЗТ

совместному воздействию температуры и радиационного облучения.

В дальнейшем модуль упругости E^p и произведение αE^p на интервале изменения температуры представим степенными полиномами:

$$E^p + \sum_{i=0}^2 A_i T^i; \quad \alpha E^p = \sum_{i=0}^2 B_i T^i. \quad (21)$$

Запишем уравнения термоупругих лопаток (7) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} & \nabla_m^4 \bar{w} + 2P_{2,1} P_2^{-1} (\bar{w}_{,111} + m^2 \bar{w}_{,122}) + 2m^2 P_{2,2} P_2^{-1} \times \\ & \times (\bar{w}_{,112} + m^2 \bar{w}_{,222}) + P_2^{-1} (P_{2,11} + m^2 P_{2,22}) \times \\ & \times (\bar{w}_{,11} + m^2 \bar{w}_{,22}) - (1 - \nu) m^2 P_2^{-1} (P_{2,11} \bar{w}_{,22} + P_{2,22} \bar{w}_{,11} - \\ & - 2P_{2,12} \bar{w}_{,12}) - d_1 \bar{F}_{,22} - \frac{l^2 U}{D_1} \bar{w}_{,11} + \frac{(1 + \nu) l^2}{h^2} P_2^{-1} \times \\ & \times (P_{3,11} + m^2 P_{3,22}) + \frac{p_1 l^3}{D_1} \bar{w}_{,1} = \left[\frac{U l^4}{R D_1 h} + \frac{q l^4}{D_1 h} \right], \\ & \nabla_m^4 \bar{F} - 2S_2^{-1} S_{2,1} (\bar{F}_{,111} + m^2 \bar{F}_{,122}) - 2m^2 S_2^{-1} S_{2,2} \times \\ & \times (\bar{F}_{,112} + m^2 \bar{F}_{,222}) + [(2S_2^{-2} S_{2,1}^2 - S_2^{-1} S_{2,11}) + \\ & + m^2 (2S_2^{-2} S_{2,2}^2 - S_2^{-1} S_{2,22})] (\bar{F}_{,11} + m^2 \bar{F}_{,22}) - (1 + \nu) m^2 \times \\ & \times [(2S_2^{-2} S_{2,2}^2 - S_2^{-1} S_{2,22}) \bar{F}_{,11} + (2S_2^{-2} S_{2,1}^2 - S_2^{-1} S_{2,11}) \times \\ & \times \bar{F}_{,22} - 2(2S_2^{-2} S_{2,1} S_{2,2} - S_2^{-1} S_{2,12}) \bar{F}_{,12}] + \frac{m^2 l^2 S_2}{R E h} w_{,22} = \\ & = \frac{l^2}{E h^2} [S_{3,11} - 2S_{3,1} S_2^{-1} S_{2,1} + 2S_{3,2} S_{2,1} S_2^{-2} - \\ & - S_3 S_2^{-1} S_{2,11} + m^2 (S_{3,22} - 2S_{3,2} S_2^{-1} S_{2,2} + 2S_{3,2} S_{2,2} S_2^{-2})] - \\ & - \frac{(1 - \nu) l^2}{E h^3} [U_{,11} - 2S_2^{-1} S_{2,1} U_{,1} + (2S_2^{-2} S_{2,1}^2 - S_2^{-1} S_{2,11}) U + \\ & + m^2 (2S_2^{-2} S_{2,2}^2 - S_2^{-1} S_{2,22}) U]. \end{aligned} \quad (22)$$

Граничные условия (12) на краях лопатки, прилегающих к диску, переписуются в виде:

$$\bar{w} = \bar{w}_{,2} = \bar{F} = \bar{F}_{,2} = 0. \quad (23)$$

Граничные условия по входной и выходной кромкам лопатки (13) будут:

$$\begin{aligned} & \bar{w}_{,11} + \nu m^2 \bar{w}_{,22} = - \frac{M_{T_1} l^2}{D_1 h}, \\ & \bar{w}_{,111} + (2 - \nu) m^2 \bar{w}_{,122} - D_{1,1} D_1^{-1} (w_{,11} + \nu m^2 \bar{w}_{,22}) - \\ & - (2 - 2\nu) m^2 D_{2,2} D_1^{-1} \bar{w}_{,12} = - \frac{(M_{T_1})_{,1} l^2}{D_1 h}, \\ & m^2 \bar{F}_{,22} + \frac{U l^2}{E^* h^3} = 0, \quad \bar{F}_{,12} = 0. \end{aligned} \quad (24)$$



Аналитическое решение краевой задачи. Рассмотрим задачу термоупругости для трапециевидных цилиндрических лопаток центробежных насосов (рис. 2). Лопатка свободно закреплена по краям, прилегающим к дискам (допускается смещение кромок лопатки в тангенциальном направлении) и имеющей граничные условия по входной и выходной кромкам лопатки, соответствующих свободному краю, для которой решается задача линейной несвязанной квазистатической теории термоупругости с учетом радиационного облучения.

Решение задачи существенным образом зависит от вида температурного поля как с точки зрения метода решения, так и получения промежуточных и конечных результатов. Поэтому анализ необходимо проводить для конкретного температурного поля. В дальнейшем весь анализ приводится для температурного поля вида (18), при этом закон изменения температуры по толщине лопатки $T(\beta)$ может быть произвольным. Аналогичные условия накладываются и на функцию $f(\xi, \eta)$.

К решению краевой задачи, описываемой системой уравнений (22) и граничными условиями (23) и (24), применяется метод интегральных соотношений [9].

В соответствии с методом представим исходную систему уравнений (22) в дивергентной форме:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \eta} + \bar{L} = 0, \quad (25)$$

где $\bar{X} = \{X_i\} = \{\bar{w}_{z_1}, z_2, z_3, \bar{F}, z_4, z_5, z_6\}$, $\bar{Y} = B_0 \bar{X} + B_1 X_{,2} + B_2 X_{,22} + B_3 X_{,222}$, $\bar{L} = B \bar{X} + b$.

Обозначим функции $z_1, \dots, z_6$ следующим образом: $z_1 = w_{,1}$, $z_2 = w_{,11}$, $z_3 = w_{,111}$, $z_4 = F_{,1}$, $z_5 = F_{,11}$, $z_6 = F_{,111}$.

В уравнениях (25) $B_r = \{b_{m,n,s}\}$; $B = \{b_{mn}\}$ ($s = 0, 1, 2, 3$; $m, n = 1, 2, \dots, 8$) являются матрицами преобразования, конкретный вид которых зависит от выбранного температурного поля.

Следуя методу интегральных соотношений, ищем решение системы уравнений (25) в виде разложения:

$$\bar{X}_i(\xi, \eta) = \sum_{j=1}^n X_{ij}(\xi) P_j(\xi, \eta), \quad i = 1, \dots, 8. \quad (26)$$

Здесь в качестве системы аппроксимирующих функций выбираются степенные полиномы Якоби, и ортогональные на отрезке $[r, \alpha r]$:

$$P_j(\xi, \eta) = P_1(\xi, \eta) \sum_{j=1}^n \left[\eta - \frac{(1 + \alpha)r}{2} \right]^{j-1},$$

$$P_1(\xi, \eta) = \eta^4 - 2(1 + \alpha)r\eta^3 + (1 + 4\alpha + \alpha^2)r^2\eta^2 - 2\alpha(1 + \alpha)r^3\eta + \alpha^2r^4, \quad (27)$$

где $r = 1 + k_1 m \xi$.

Ограничиваясь двухчленным приближением и выбирая в качестве весовых функций такие степенные полиномы Якоби (27) и их производные, после применения процедуры метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений (25), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений порядка $8n$ с переменными коэффициентами, которую представим в нормальной форме Коши:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^{m^*} A_{m,v} X_v + f_m, \quad m = 1, 2, \dots, m^*, \quad (28)$$

где v — номер неизвестной функции, при которой стоит коэффициент $A_{m,v}$; v — номер уравнения.

Аналитическое решение системы уравнений (28) будем строить модифицированным методом последовательных приближений [10, 11].

Общее решение системы дифференциальных уравнений (28) представится следующим образом:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{m^*} C_{\mu} \left[\frac{\xi^{\mu-m}}{(\mu-m)!} \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] +$$

$$+ \sum_{j=0}^q B_{m,j,0} \frac{\xi^{j+1}}{(j+1)!} + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}, \quad m = 1, 2, \dots, m^*, \quad (29)$$

где $b_{m,j,0} = f_{m,k}$ при $j = k$; μ — номер фундаментальной функции; C_{μ} — постоянные интегрирования; $\delta = 1$, если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ ;

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,\mu,n,j} \frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!};$$

$$X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{m,n,j} \frac{\xi^{n+j-1}}{(n+j-1)!}. \quad (30)$$

Здесь $\beta = q + 1$; коэффициенты $b_{m,\mu,n,j}$ и $b_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам.

Постоянные C_{μ} , входящие в общее решение системы, находятся из граничных условий на двух других краях лопатки (24).

Пример расчета. Рассмотрим задачу термоупругости для трапециевидной лопатки центробежного насоса при граничных условиях (23) и (24), подверженной воздействию стационарного температурного поля вида (18), где $T(\beta) = T_0^* + \beta \Delta T$, $T_1 = 500^\circ \text{C}$, $f(\xi, \eta) = 3(\eta + \xi)^2$, $T_2 = 300^\circ \text{C}$.

Геометрические параметры лопатки: $l = b_1 = 260$ мм, $\alpha = 0$, $\gamma_1 = 14^\circ$, $h = 6$ мм. Материал лопатки: жаростойкая сталь X14Г14НЗТ. (Зависимость физико-механических характеристик материала от температуры приведена на рис. 4.)

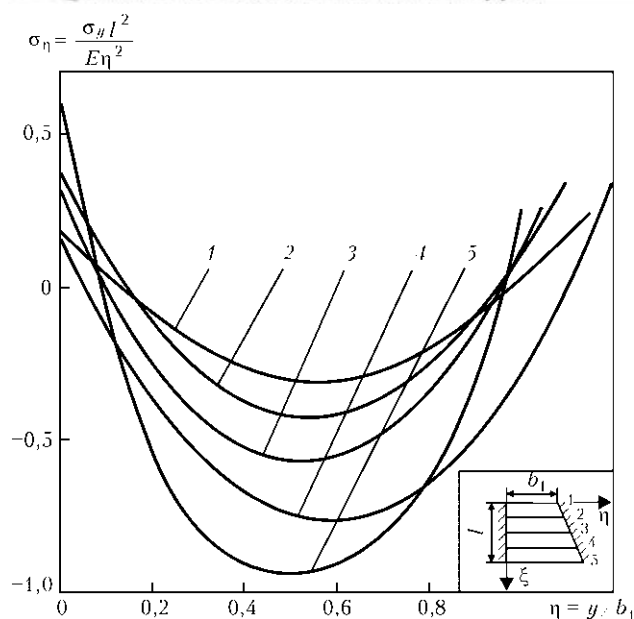


Рис. 5. Температурные напряжения 1 – 5 в рабочей лопатке центробежного насоса

На рис. 5 приводятся температурные напряжения σ_η в рабочей лопатке центробежного насоса. Отметим, что наибольший уровень напряжений наблюдается на входной кромке лопатки (сечение 5). Подчеркнем, что вклад радиационного облучения в общее напряженное состояние рабочих лопаток центробежных насосов составляет порядка 4 %.

Результаты приведены для лопатки, выполненной из жаростойкой стали X14Г14НЗТ. Очевидно, что предложенный алгоритм может быть легко распространен на другие конструкционные материалы.

Выводы

Разработана методика определения ресурса центробежных и осевых насосов ядерной энергетики на основе теории оболочек с учетом НДС при воздействии высокотемпературных радиационных полей.

Алгоритм аналитического решения краевой задачи для системы эллиптических уравнений ос-

нован на комбинации метода интегральных соотношений и модифицированного метода последовательных приближений [10, 11].

Приводится пример расчета лопатки центробежного насоса, изготовленной из жаростойкой стали X14Г14НЗТ, при воздействии высокотемпературного радиационного поля. Отметим, что вклад радиационного облучения в общее термонапряженное состояние рабочих лопаток центробежных насосов составляет порядка 4...5 %.

1. Пухлий В. А., Маловик К. Н. Прочность и ресурс оборудования реакторов АЭС в условиях сложного нагружения // Матер. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электромагнитные и акустические методы неразрушающего контроля материалов и изделий» Леотест-2011. — Славское, 2011.
2. Пухлий В. А. Научные труды в 4-х томах. Т. 2. Однородные и слоистые оболочки переменной жесткости. — Черкасы: Изд-во «Черкас. ЦНТЭ», 2002. — 362 с.
3. Гетман А. Ф. Обеспечение прочности и ресурса оборудования реакторов АЭС в эксплуатации на основе системного подхода // Совершенствование уровня эксплуатации АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 344 с.
4. Гетман А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 420 с.
5. Аркадов Г. В., Гетман А. Ф., Родионов А. Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 424 с.
6. Ильюшин А. А., Огибалов П. М. Упругопластические деформации полых цилиндров. — М.: Изд-во МГУ, 1960. — 224 с.
7. Платонов П. А. Действие облучения на структуру и свойства металлов. — М.: Машиностроение, 1971. — 402 с.
8. Пухлий В. А. Научные труды в 4-х томах. Т. 3. — Динамика и прочность радиальных и осевых турбомашин. — Черкасы: Изд-во «Черкас. ЦНТЭ», 2001. — 500 с.
9. Пухлий В. А. Численные методы. Теория и практикум в среде MATLAB: в 2-х томах. Т. 1. — Черкасы: Изд-во «Черкас. ЦНТЭ», 2007. — 412 с; Т. 2 — Черкасы: Изд-во «Черкас. ЦНТЭ», 2008. — 742 с.
10. Пухлий В. А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений // Вычислит. математика и математ. физика. — 1978. — 18, № 5. — С. 1275–1282.
11. Пухлий В. А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики / Дифферен. уравнения. — 1979. — 15, № 11. — С. 2039–2043.

Поступила в редакцию
10.05.2011



ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ

М. О. КАРПАШ, канд. техн. наук (Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу)

Проведено короткий аналіз існуючих методів підвищення чутливості неруйнівного контролю на прикладі акустичного методу, результати якого вказали на їх недоліки та дозволили встановити напрямки подальших досліджень. Запропоновано новий метод підвищення чутливості неруйнівного контролю, що полягає у застосуванні штучних нейронних мереж до вимірювальної інформації за відношення сигнал/шум, що є значно меншими одиниці. Проведено моделювання запропонованого методу на теоретичних даних, а також приведено результати його експериментальної апробації за умов безконтактного ультразвукового контролю геометричних параметрів сталевих виробів.

Brief analysis of available methods of improvement of NDT sensitivity was performed for the case of an acoustic method, the results of which revealed their drawbacks and allowed establishing the directions of further research. A new method is proposed to improve NDT sensitivity that consists in application of artificial neural networks to measurement data based on signal/noise ratio that is much lower than a unity. Simulation of the proposed method was performed on theoretical data, and the results of its experimental verification under the conditions of contactless ultrasonic control of geometrical parameters of steel products are given.

Зростання рівня існуючих технологій НК в переважній більшості галузей промисловості ґрунтується на поглибленні знань щодо використання нових матеріалів при виготовленні первинних перетворювачів і методів оброблення вимірювальної інформації. Останній напрямок є особливо актуальним стосовно тих методів НК, що застосовуються для контролю напружено-деформованого стану, визначення фізико-механічних характеристик матеріалів, оцінки структури матеріалів, розпізнавання типів дефектів, дослідження кінетики початкової стадії руйнування взірців та виробів під час випробувань.

Слід зазначити, що за проведення наведених вище видів НК, як правило, відсутні або складні у відтворенні взірці для налаштування апаратури, а також складно встановити критерії відбракування.

Характерною особливістю оцінки результатів контролю під час визначення вказаних вище параметрів є складність інтерпретації інформаційних сигналів, оскільки одержувана інформація про результати контролю не завжди однозначна, інформаційні сигнали зашумлені, або у кращому випадку їх амплітуда співрозмірна з рівнем завад.

Особливо актуальна ця проблема під час використання акустичних методів контролю, що надзвичайно широко використовуються в промисловості. Основними перевагами акустичного методу є його висока чутливість, проникна здатність та здатність щодо миттєвої індикації дефектів.

Проілюструємо актуальність описаної проблеми на прикладі, що характерний і для інших застосувань — контроль геометричних параметрів безконтактним ультразвуковим (УЗ) методом. До обмежень фізичного характеру цього методу на-

лежить те, що значна частина енергії УЗ коливань на границях розділу (п'єзоелемент/повітря, повітря/метал та метал/повітря) втрачається. На частоті коливань в межах 1 МГц відношення сигнал/шум значно перевищуватиме 1. Компенсування значної частини втрат енергії на першій границі розділу може бути забезпечене завдяки використанню нових матеріалів, які б дали змогу узгодити акустичні імпеданси п'єзоелементу та повітря. Проте завади, що створюються на межі розділу повітря/метал, можливо частково подолати виключно завдяки застосуванню нових способів оброблення сигналів.

Існує значна кількість достатньо розвинутих методів підвищення точності та подолання завад при УЗ НК. Серед них слід згадати метод випробувальної методології за калібрувальними чинниками завад, що базується на вимірюванні відкликів приладу при поданні на нього каліброваних заважаючих збуджень в зоні випробувань [1]. Аналіз записаних відкликів забезпечує можливість розрахунку коригувань результатів вимірювань, підібрати відповідні методики оброблення даних [2] та визначити невизначеності вимірювань [3]. Проте даний підхід суттєво залежить від конкретного об'єкта контролю, оскільки калібрування відбувається за місцем, а також потребує суттєвої попередньої підготовки [4].

Також відома методика адаптивного подавлення шуму при обстеженні об'єктів із анізотропною різнозернистою структурою УЗ методом [5]. Методика базується на використанні адаптивного фільтру методу найменших квадратів у поєднанні із еталонним та довідковим сигналами, отриманими із двох суміжних положень перетворювача. Серед переваг даного методу слід виділити



відносно покращення відношення сигнал/шум майже у 1,5 рази порівняно із початковим сигналом.

Відомий метод [6] виділення детермінованих складових сигналів, який полягає у тому, що вибирають оптимальний низькочастотний фільтр шляхом аналізу сигналу за паралельними каналами, в кожному з яких двічі виконується фільтрація шляхом одно- та двократного пропускання вихідного сигналу через фільтр низьких частот із подальшим виділенням енергії різниці сигналів двох фільтрацій визначають канал із максимальною енергією зі сторони низькочастотних каналів, який і містить оптимальний фільтр низьких частот. Детерміновану складову визначають як суму двох сигналів, перший із яких є реакцією оптимального низькочастотного фільтра на вихідний сигнал, а другий пропорційний різниці першого сигналу і реакції двократного проходження через оптимальний фільтр вихідного сигналу з коефіцієнтом пропорційності. Після цього різницю між вихідним сигналом і детермінованою його складовою приймають за новий сигнал і цикл операцій повторюють до співпадіння місця положення максимуму на спектрі енергій із положення на попередньому циклі.

До недоліків даного методу слід віднести необхідність виконання великої кількості обчислень, що унеможливує його використання в умовах реального часу. Іншими недоліками вказаного методу є чутливість до наявності гаусового шуму в сигналі, який буде спричиняти суттєві спотворення енергетичного спектру, а також призводити до виникнення похибок даного методу.

Відомий також спосіб [7] виділення характеристик форми сейсмічних сигналів. Даний метод призначений для розпізнавання сигналів за їх формою. Вважається, що кожен вхідний сигнал є комбінацією основного сигналу із певної групи та шуму. Основний сигнал для кожної групи отримується шляхом виділення форм сигналів із ортонормальними основами. Таким чином, основний сигнал репрезентує окрему групу сигналів. Метод реалізується шляхом використання так званого плаваючого вікна — спосіб аналізування сигналів із одиничним кроком по вибірці в межах обраного розміру сигналу, який необхідно детектувати.

Даний метод характеризується високою імовірністю невірної класифікації сигналу, оскільки вплив розміру шуму (відношення сигнал/шум) не врахований.

Існує також метод, який передбачає використання гібридної системи на базі нейронних мереж [8–10] та вейвлет-перетворення [11] для класифікації сигналів або зображень, представлених сигналом в системі даних. Система класифікації складається із одного або більше здавачів для прийняття сигналів, засобів вейвлет-перетворення вхідних сигналів, засобів класифікації сигналів згідно кількох визначених категорій і генерування

вихідних класифікаційних сигналів. Як засіб вейвлет-перетворення використовують модуль розрахунку заданої кількості коефіцієнтів вейвлет. Як засіб класифікації використовують набір гібридних нейронних мереж, кожна із яких складається із нейромережі визначення місця розташування, нейромережі визначення величини сигналу та класифікаційної нейромережі.

До суттєвих недоліків вказаного методу слід віднести вплив вибору кількості коефіцієнтів вейвлет-перетворення (обирається оператором) та точності визначення місця положення та величини сигналу на похибку вірного детектування, яка може бути достатньо значною для сигналів із значними рівнями шуму.

Достатньо поширеним та перспективним є кореляційний метод детектування із використанням кодів Баркера [12–14]. Суть зазначеного методу полягає у розрахунку значень кореляції отриманої вибірки зашумленого сигналу із ідеальним сигналом. Найчастіше для підвищення інформативності та чутливості методу ідеальний сигнал певним чином кодується. Найкращими для вирішення цієї задачі є коди Баркера.

Проте зі всіх кодів Баркера найбільш придатним для застосувань при дослідженні ультразвуком є код типу «+1 –1», який може бути представлений звичайною синусоїдою (рис. 1) і є найкоротшою послідовністю. Це слід вважати найсуттєвішим недоліком застосування послідовності кодів Баркера в акустичному контролі матеріалів та пояснюється специфікою роботи реальних п'єзоелектричних елементів [15] — коди із більшою кількістю елементів не можуть бути правильно відтворені з огляду на певну інерційність в роботі п'єзоелементів.

В даній роботі запропоновано спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму шляхом використання штучних нейронних мереж, аналізу значень виходів нейронів у прихованому шарі мережі при подаванні на її вхід зашумленого корисного сигналу, причому, кількість входів і ви-

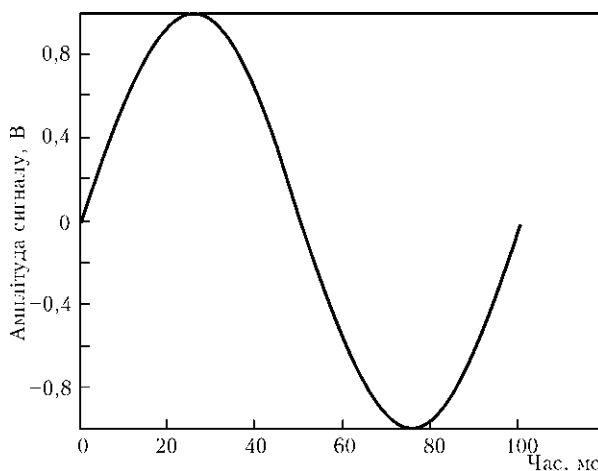


Рис. 1. Зразок ідеального сигналу



ходів мережі повинна дорівнювати тривалості корисного сигналу, поділений на крок його квантування, що дозволить використовувати даний спосіб в галузі НК для виявлення дефектів у матеріалах та виробів при їх УЗ дослідженні, в радіолокації для виявлення об'єктів на фоні значних завад, а також у інших сферах техніки, які пов'язані із обробкою сигналів з високими значеннями шуму.

Суть запропонованого способу полягає у виконанні певної послідовності обчислювальних операцій, описаних у патенті [16]. По вибірці із сигналами (рис. 2) реалізовується так званий метод плаваючого вікна. Тобто, аналізується весь сигнал частинами, розмірність яких відповідає розмірності корисного сигналу (рис. 1), який необхідно виявити — із кроком 1 таке вікно пересувається вздовж всього сигналу.

В такому разі задача зводиться до аналізу вибірки із сигналу, яка може містити корисний сигнал або шум. Іншими словами, необхідно розпізнати

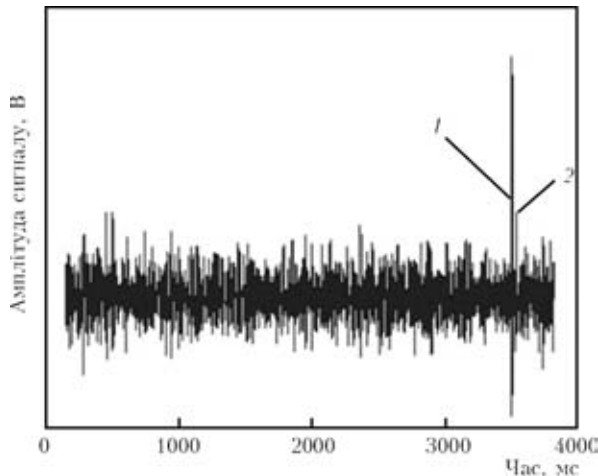


Рис. 2. Вибірка аналізованого акустичного сигналу: 1 — УЗ імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні на екрані осцилографа; 2 — УЗ імпульс, відбитий від зовнішньої поверхні на екрані осцилографа, рівень якого близький до рівня шуму

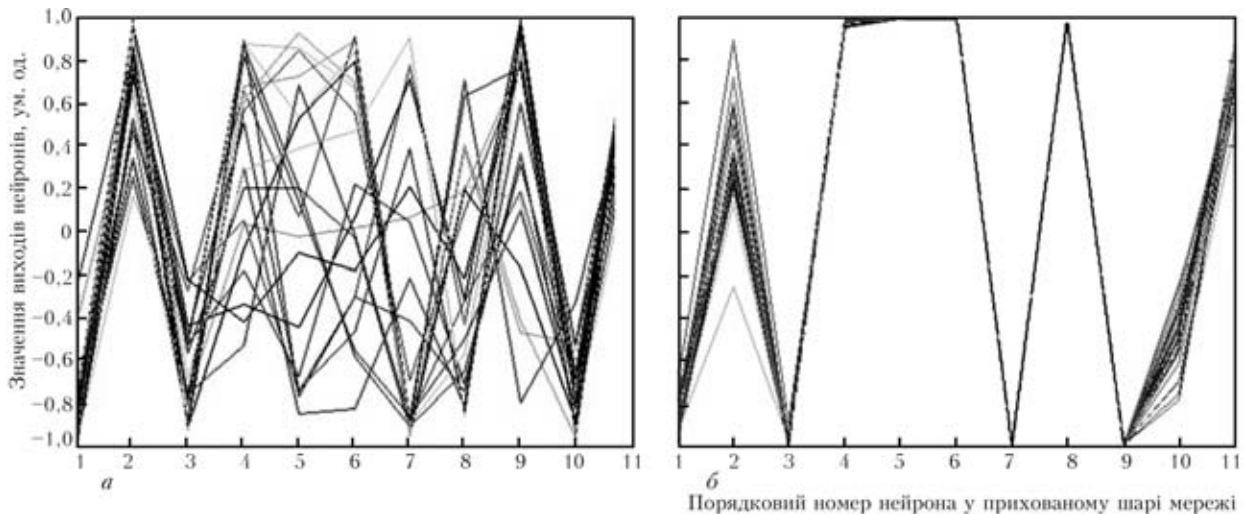


Рис. 3. Виходи нейромережі за відсутності у вхідному масиві корисного сигналу (а) та за різного рівня відношення сигнал/шум (б)

в зашумленому сигналі корисний, що може вважатись синусоїдально-подібним (див. рис. 1).

Для вирішення означеної задачі розпізнавання образів використовується нейронна мережа зі зворотним поширенням помилок, яка тренується шляхом подавання на її вхід і на вихід ідеального корисного сигналу. В мережі передбачається один прихований шар із довільною кількістю нейронів в межах 5–13. Наприклад, для пояснення реалізації способу було обрано 11 нейронів.

Процедура тренування полягає у налаштуванні вагових коефіцієнтів у вузлах (нейронах) мережі. Мережа із одним прихованим шаром тренується із заданим рівнем похибки (не більше 1...2 %) шляхом подавання на її вхід та вихід корисного сигналу без шуму, причому, кількість входів і виходів мережі дорівнює тривалості корисного сигналу, поділений на крок його квантування [8, 9].

Таким чином, якщо розмір плаваючого вікна (відповідає кількості нейронів на вході та виході) рівний 101, а кількість нейронів у прихованому шарі складає 11, а похибка тренування 3 %, можна стверджувати, що у виходах 11 нейронів міститься інформація про всі 101 значень вхідного образу із похибкою 3 %.

Натренована таким чином нейронна мережа може розглядатись як інструмент виділення характеристик із досліджуваного сигналу, за якими можна однозначно здійснювати класифікацію досліджуваних сигналів.

Після тренування згідно вказаних критеріїв мережа придатна для роботи із новими даними. При цьому на вхід нейромережі можуть подаватись сигнали загалом двох типів — зашумлений корисний сигнал і просто шум. Якщо сигнал, поданий на вхід нейромережі, буде розпізнано як корисний і це відповідатиме дійсності, то це означатиме, що корисний сигнал виявлено. Встановлено, що значення виходів нейронів, близьке до



одиниці, вказує на те, що поданий сигнал є корисним, значення, близькі до нуля або -1 вказують на те, що поданий сигнал не є корисним, або що рівень шумів надто великий.

Для того, щоб розрізнити між двома вказаними класами сигналів, достатньо провести розрахунок виходів нейронів внутрішнього (прихованого) шару. На рис. 3 зображені виходи нейронів прихованого шару нейромережі при поданні на її вхід шумових сигналів, які не містять корисного сигналу. На рис. 4 зображені виходи нейронів прихованого шару нейромережі при поданні на її вхід зашумлених сигналів за різних рівнів шуму.

Як видно із рис. 3, виходи прихованих нейронів за різних рівнів шуму для корисного сигналу повторюються на 4, 5, 6 та 8 нейронах. Наприклад, виходи нейрону 2 суттєво змінюються в залежності від рівня шуму. На рис. 3, а для жодного із нейронів у прихованому шарі повторюваності не може бути помічено.

Отже, при поданні на вхід нейронної мережі зашумленого корисного сигналу на виходах окремих нейронів у прихованому шарі мережі будуть спостерігатись однакові значення із невеликими відхиленнями, а при поданні «білого» (гаусового) шуму — ці значення будуть суттєво відрізнятись. Експериментально перевірено, що в межах кількості прихованих нейронів 5–13 (за кількості нейронів на вході і виході рівній 100) така тенденція зберігається.

На рис. 5 показані виходи даних нейронів для корисного сигналу в залежності від рівня шуму. При цьому середнє значення суми виходів вказаних нейронів складає при подачі на вхід нейромережі зашумлених корисних сигналів — 3,98 в межах рівня шуму 0...20 дБ.

Виходи тих же нейронів при подачі на нейромережу шумових сигналів, які не містять корисного сигналу зображені на рис. 5. Середнє значення суми виходів вказаних нейронів складає 0,31.

Відомо [8], що максимальне значення виходу прихованого нейрона в мережі рівне 1, а мінімаль-

не -1 . Максимальне значення суми виходів обраних прихованих нейронів (4–6 та 8) дорівнює 4, а мінімальне — -4 . Виходи нейронів, рівні 1, відповідають подачі на вхід мережі незашумленого корисного сигналу. Для надійного виявлення корисного сигналу за високих рівнів шуму встановлено як бракувальний критерій правильності детектування корисного сигналу — сума виходів обраних нейронів повинна бути не меншою 2, що становить 75 % абсолютного значення суми виходів обраних нейронів.

Таким чином, можемо стверджувати, що шляхом оцінки виходів нейронів прихованого шару отриманої нейронної мережі можна розрізнити між зашумленим сигналом та просто «білим» (гаусовим) шумом.

Показано, що запропонований спосіб дозволяє детектувати корисні сигнали навіть за відношення сигнал/шум рівному 0,3. Зашумлений сигнал за такого рівня шуму в порівнянні з ідеальним зображено на рис. 6. Сума виходів 4-, 5-, 6- та 8-го нейронів склали 3,45.

Експериментальну перевірку запропонованого методу було здійснено на розробленій експериментальній установці для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом відповідно до запропонованої в роботі [17] методики експериментальних досліджень. Зокрема, дослідження були проведені на сталевому зразку товщиною 3,93 мм.

Додатково в роботі [18] було виконано більш широке експериментальне перевіряння запропонованого методу у порівнянні з взаємкореляційним методом — за допомогою безконтактного УЗ контролю проводили вимірювання сталевих зразків різної товщини. Запропонований метод, що базується на використанні нейронних мереж, дозволив забезпечити вимірювання товщини в діапазоні від 0,55 до 9,53 мм, а взаємкореляційний — від 0,55 до 5 мм. Для статистичного аналізу функціонування методу було отримано по

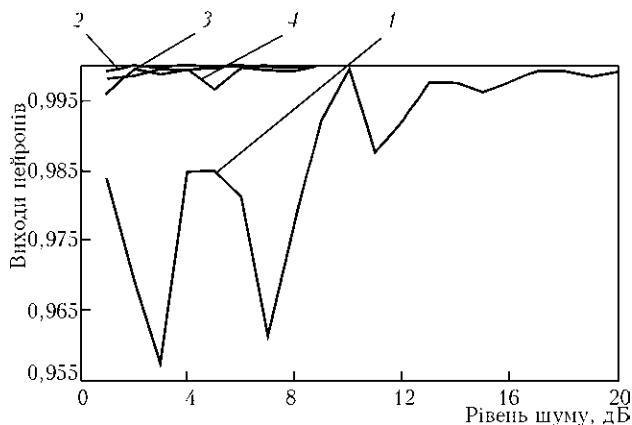


Рис. 4. Виходи нейронів залежно від рівня шуму: 1–4 — виходи 4-, 5-, 6- та 8-го нейрона прихованого шару відповідно

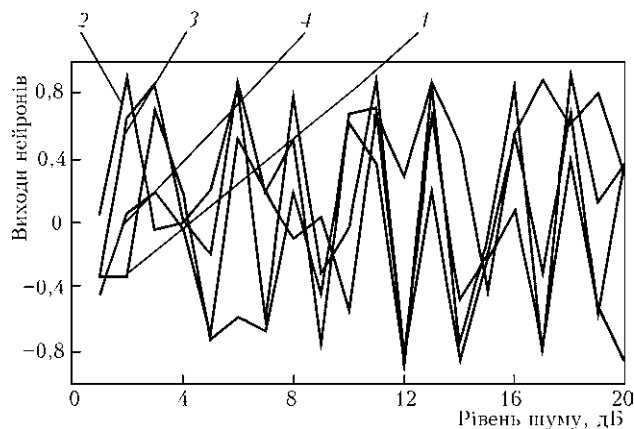


Рис. 5. Виходи нейронів при поданні шумових сигналів без корисного сигналу: 1–4 — виходи 4-, 5-, 6- та 8-го нейрона прихованого шару

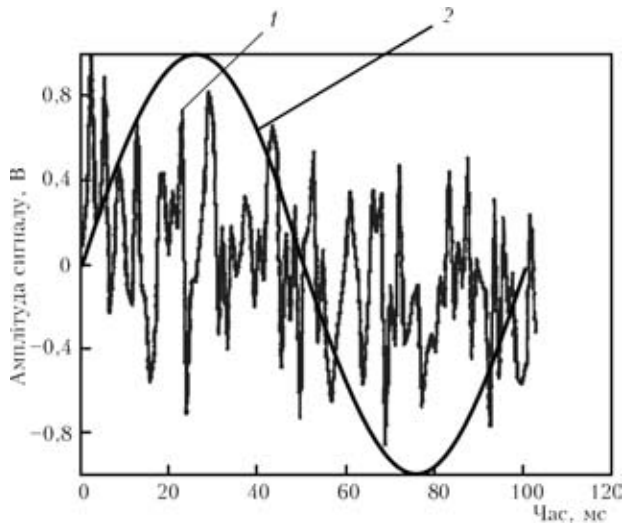


Рис. 6. Зашумлений корисний сигнал за відношенням сигнал/шум 0,3 (1) в порівнянні з ідеальним незашумленим сигналом (2)

1000 зашумлених корисних сигналів (відношення сигнал/шум рівне 0,5) та 1000 сигналів шуму.

Реалізація запропонованого методу для розглянутих наборів даних дозволяє стверджувати, що за вказаних рівнів шуму похибка правильного детектування корисного сигналу складає не більше 1,2 % (12 випадків із 1000, коли значення суми виходів нейромережі складало менше 2). В ході аналізу набору шумових сигналів кількість випадків помилкового розпізнання шуму як корисного сигналу дорівнювала 0,8 % (8 випадків із 1000).

Висновки

Експериментально доведено можливість реалізації запропонованого методу детектування корисних сигналів за умов високих значень шуму. Даний метод може бути використаний для вирішення ряду задач НК, пов'язаних із виділенням характеристик складних сигналів, зокрема для підвищення чутливості дефектоскопії та товщинометрії, підвищення імовірності виявлення дефектів та удосконалення алгоритмів функціонування засобів НК.

Приведен краткий анализ существующих методов повышения чувствительности НК на примере акустического метода, результаты которого указали на их недостатки и позволили определить направления следующих исследований. Предложен новый метод повышения чувствительности НК, состоящий в применении искусственных нейронных сетей к обработке измерительной информации при отно-

шении сигнал/шум, значительно меньшим единицы. Выполнено моделирование предложенного метода, а также описаны результаты его экспериментальной апробации в условиях бесконтактного УЗ контроля геометрических параметров стальных изделий.

1. Matiss I. New possibilities of increasing accuracy for non-destructive testing. Pt 1. Basic principles and application examples // NDT&E International. — 1999. — № 32. — P. 397–401.
2. Matiss I., Rotbakh Y. New possibilities of increasing accuracy for nondestructive testing. Pt 2. Data processing algorithms // Ibid. — P. 403–408.
3. Matiss I., Rotbakh Y. New possibilities of increasing accuracy for nondestructive testing. Pt 3. Approximation algorithms and accuracy tests // Ibid. — P. 409–413.
4. Бархатов В. А. Распознавание дефектов с помощью искусственной нейронной сети специального типа // Дефектоскопия. — 2006. — № 2. — С. 28–39.
5. Kim J., Udpa L., Udpa S. Multi-stage noise cancellation for ultrasonic NDE // NDT&E International. — 2001. — № 34. — P. 319–328.
6. Пат. 2028629 РФ, МПК G01R23/16. Способ выделения детерминированных составляющих сигнала / Е. Л. Кулешов, Н. В. Никитина, В. А. Смолин; Заявл. 04.04.90; Опубл. 09.02.95.
7. Pat. 6105015 US. Wavelet-based hybrid neurosystem for classifying a signal or an image represented by the signal in a data system / K. Gong, C. Nguyen, S. Hammel; Опубл. 03.02.1997.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 344 с.
10. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 176 с.
11. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. — М.: Изд-во ДМК, 2005. — 304 с.
12. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.
13. Малыгин И. В. Коды, коды, коды... // Технология и средства связи. — 1999. — № 3. — С. 53–57.
14. Качанов В. К. Использование радиолокационных сигналов и методов их обработки в ультразвуковой дефектоскопии композиционных материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 2. — С. 3–17.
15. Кажис Р. О формировании псевдослучайных кодовых последовательностей пьезоэлектрическими преобразователями // Радиоэлектроника. — 1976. — 12, № 1. — С. 130–140.
16. Пат. на винахід UA 87910 Україна, МПК G 01 R 23/16. Спосіб детектування сигналів із високими значеннями шуму / М. О. Карпаш, О. М. Карпаш; Заявл. 07.07.2008; Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
17. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом // Методи та прилади контролю якості. — 2008. — № 20. — С. 7–12.
18. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 31–35.

Надійшла до редакції
14.04.2011



ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЯ УДАРНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕНАЖЕ И ШАРПИ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ

В. П. ДЯДИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Выполнен краткий анализ основных преимуществ и недостатков стандартных ударных образцов с острым (Шарпи) и круглым надрезами (Менаже). Показано, что для случая их хрупкого разрушения между данными образцами существует устойчивая связь, которая в ряде случаев может быть использована при диагностировании ответственных конструкций для оценки дефектов с позиций механики разрушения.

Brief analysis of the main advantages and disadvantages of standard impact samples with sharp (Charpy) and round (Mesnager) notches was performed. It is shown that for the case of their brittle fracture there exists a stable connection between these samples, which in a number of cases can be used at diagnostics of critical structures for assessment of defects in terms of fracture mechanics

Определение ударной вязкости на стандартных образцах Менаже в странах СНГ применяется до сих пор несмотря на то, что практически во всем мире используется образец Шарпи. При этом основной довод в пользу образца Менаже сводится к тому, что данный радиус закругления (1,0 мм) позволяет более полно охватить исследуемую зону сварного соединения или основного металла. Это дает возможность оценить среднюю интегральную характеристику вязкости сварного соединения при проведении меньшего количества испытаний по сравнению с образцами Шарпи, которые из-за малого радиуса закругления в вершине надреза (0,25 мм) не могут охватить всю исследуемую область.

Вместе с тем отсутствие максимальных областей стеснения материала перед надрезом образца Менаже не позволяет воссоздать реальную картину распределения напряжений в процессе разрушения, присущих трещиноподобному дефекту, которые типичны для сварных конструкций. В этой связи определяемая температура вязко-хрупкого перехода на данном типе образца сдвигается в область более низких температур, что не соответствует реальной картине разрушения сварных элементов.

Из отечественной и зарубежной практики хорошо известно, что предъявляемые требования к величине ударной вязкости образца Шарпи достаточно хорошо согласуются с сопротивлением конструкционных сталей и их соединений возможному росту несплошностей типа трещин, которые контролируются с помощью различных критериев механики разрушения. Иными словами, значения ударной вязкости образца Шарпи характеризуют косвенным образом сопротивление конструкционных материалов и их соединений возможному росту дефектов (трещиностойкость).

Установление возможной связи между данными типами образцов при различных видах разрушения — вязком, квазихрупком и хрупком — позволило бы значительно расширить использование подходов механики разрушения при диагностике сварных конструкций и оценке их дальнейшей работоспособности с учетом выявляемых несплошностей неразрушающими методами контроля.

Случай вязкого разрушения был рассмотрен в работе [1]. В данной статье рассматривается вариант хрупкого разрушения стандартных образцов Менаже и Шарпи.

В отличие от вязкого разрушения, когда в вершине надреза образца достигаются критические значения деформаций ϵ_f , хрупкое разрушение возникает при условии достижения локальными растягивающими напряжениями некоторой критической величины, равной сопротивлению микросколу материала R_{mc} или его макроскопическому эквиваленту — сопротивлению отрыва R_σ [2–5].

Таким образом, условие хрупкого разрушения образца сводится к обеспечению за счет объемности напряженного состояния вблизи надреза деформационного упрочнения и динамического нагружения такой степени перенапряжения, которая позволяет реализовать условие $\sigma_{\max} \approx R_{mc}$, где $\sigma_{\max}$ — максимальные локальные напряжения в образце.

Распределение локальных напряжений на некотором расстоянии от вершины надреза в зависимости от угла прогиба стандартного образца может быть получено с учетом результатов работ [1, 6].

В этом случае связь между углом изгиба образца и величиной локальных напряжений и пластических деформаций при условии степенного закона упрочнения материала описывается выражением:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \frac{\epsilon}{\epsilon_{0,2}} = \frac{K^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho} x\right)} \left(\frac{\theta}{3 \epsilon_{0,2}}\right)^{1+n}, \quad (1)$$

где ε — локальная пластическая деформация на расстоянии x от вершины надреза ударного образца; $\varepsilon_{0,2}$ — пластическая деформация, соответствующая пределу текучести $\sigma_{0,2}$ материала; ρ — радиус надреза; n — величина деформационного упрочнения материала; K — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза радиуса ρ стандартного ударного образца; θ — угол прогиба образца.

Учитывая, что перед возникновением общей текучести вблизи вершины надреза образца возникает область объемного напряженного состояния [1, 7] зависимость (1) в этом случае может быть записана в виде:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0,2}} = \left(1 + \ln\left(1 + \frac{x}{\rho}\right)\right) \frac{K^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho}x\right)} \left(\frac{\theta}{3\varepsilon_{0,2}}\right)^{1+n}. \quad (2)$$

Поскольку стеснение в образце Шарпи определяется углом надреза [1,8], максимальные растягивающие напряжения $\sigma_{\max}$, при которых реализуется хрупкое разрушение данного типа образца, можно описать зависимостью:

$$\frac{R_{mc}}{\sigma_{0,2}} \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{0,2}} = 2,18 \frac{K_1^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_1}x_1\right)} \left(\frac{\theta_{1k}}{3\varepsilon_{0,2}}\right)^{1+n}, \quad (3)$$

где $\rho_1 = 0,25$ мм — радиус в вершине надреза стандартного ударного образца Шарпи; K_1 — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза стандартного ударного образца Шарпи, равный 3,44; θ_{1k} — критический угол прогиба образца Шарпи; ε_f — критическая локальная пластическая деформация на расстоянии x_1 от вершины надреза образца; x_1 — расстояние от вершины надреза до точки максимального стеснения образца, которое может быть определено из зависимости [7]:

$$2,18 = 1 + \ln\left(1 + \frac{x_1}{\rho_1}\right). \quad (4)$$

Необходимо отметить, что стеснение образца может реализовываться только в зоне концентрации напряжений, поэтому корректность зависимости (3) достигается при выполнении условия:

$$\frac{K_1^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_1}x_1\right)} \geq 1. \quad (5)$$

Как видно из выражения (4), это условие для образца Шарпи полностью выполняется.

Что касается определения максимальных растягивающих напряжений, которые могут быть достигнуты в образце Менаже, то здесь необходимо отметить следующее. Поскольку теоретически возможное стеснение в образцах с трещи-

ной в соответствии с критерием текучести Треска равно 2,57 [8], можем записать:

$$2,57 = 1 + \ln\left(1 + \frac{x_2}{\rho_2}\right). \quad (6)$$

Расстояние от вершины надреза образца Менаже в этом случае должно быть равно $x_2 = 3,8$ мм, что в пределах точности используемых зависимостей невозможно из-за нарушения условия:

$$\frac{K_2^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_2}x_2\right)} \geq 1, \quad (7)$$

где K_2 — коэффициент концентрации упругих напряжений в вершине надреза стандартного ударного образца Менаже, равный 2,1; $\rho_2 = 1,0$ мм — радиус в вершине надреза стандартного ударного образца Менаже; x_2 — расстояние от вершины надреза до точки максимального стеснения образца.

Таким образом, максимальные растягивающие локальные напряжения, при которых может реализоваться условие хрупкого разрушения образца Менаже, должны определяться следующими выражениями:

$$\frac{R_{mc}}{\sigma_{0,2}} \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{0,2}} = \left(1 + \ln\left(1 + \frac{x_2}{\rho_2}\right)\right) \frac{K_2^2}{\left(1 + \frac{4}{\rho_2}x_2\right)} \left(\frac{\theta_{2k}}{3\varepsilon_{0,2}}\right)^{1+n} \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{K_2^2 - 1}{2} \rho_2 \approx 0,85 \text{ мм}, \quad (9)$$

где θ_{2k} — критический угол прогиба образца Менаже.

Рассмотренные выражения позволяют количественно оценить различие в максимальных стеснениях, возникающих в образцах рассматриваемых типов: для образца Менаже $\sigma_{\max}/\sigma_{0,2} \approx 1,61$; для образца Шарпи $\sigma_{\max}/\sigma_{0,2} \approx 2,18$.

Пренебрегая некоторыми изменениями величины R_{mc} в зависимости от предшествующей разрушению величины пластической деформации, нетрудно сопоставить критические углы прогибов образцов Менаже и Шарпи в температурной области, где в обоих типах образцов реализуется квазихрупкое разрушение (зарождение хрупкой трещины при напряжениях, близких к пределу общей текучести).

В этом случае, сопоставляя зависимости (3) и (8), получаем:

$$\frac{\theta_{2k}}{\theta_{1k}} \approx (1,58)^{1/(1+n)}. \quad (10)$$

Учитывая зависимость (10) и данные работы [1], соотношение между удельными работами за-



рождения хрупкого разрушения образцов Менаже и Шарпи можно выразить зависимостью:

$$\frac{KCU^{(3)}}{KCV^{(3)}} = \frac{k_3}{k_1} \left(\frac{\theta_{2k}}{\theta_{1k}} \right)^{1+n} \approx 1,55, \quad (11)$$

где k_1 — коэффициент стеснения для образца Шарпи, равный 1,25 [9]; k_3 — коэффициент стеснения для образца Менаже, равный 1,225 [9]; $KCU^{(3)}$ — удельная работа зарождения хрупкого разрушения образца Менаже; $KCV^{(3)}$ — удельная работа зарождения хрупкого разрушения образца Шарпи.

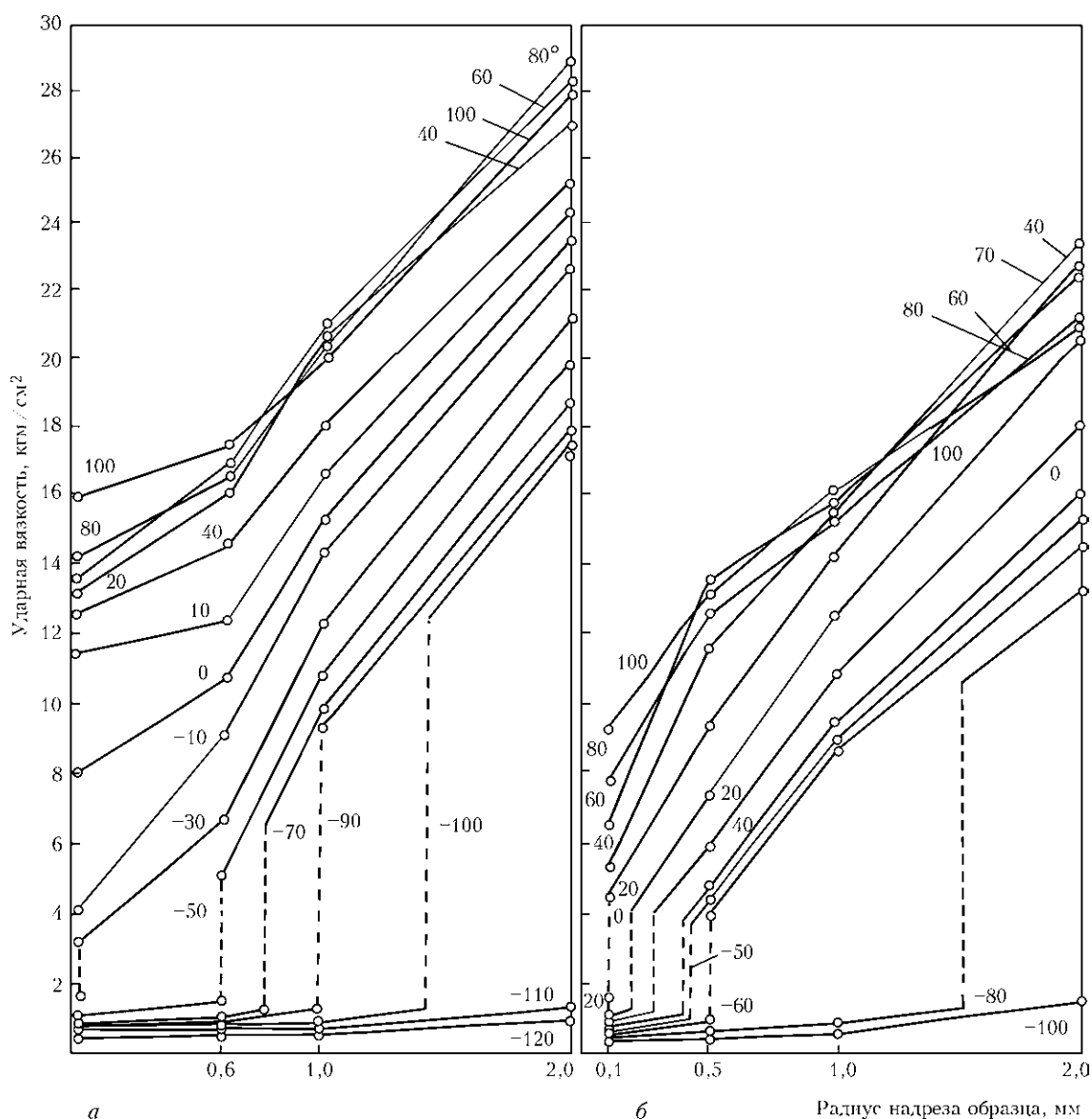
В то же время работа распространения при условии хрупкого разрушения практически равна нулю. Отношение полных удельных работ в этом

случае будет полностью совпадать с правой частью выражения (11):

$$\frac{KCU}{KCV} \approx 1,55. \quad (12)$$

Полученный результат, на первый взгляд, является несколько неожиданным, поскольку практически совпадает со случаем вязкого разрушения ударных образцов этих типов. Однако, как показывают результаты, приведенные в работе [10], данный вывод вполне закономерен и является аналитическим подтверждением факта существования линейной связи между этими характеристиками при условии хрупкого разрушения ударных образцов (рисунок).

Важно также отметить, что полученный результат для основной массы строительных конструк-



Зависимость ударной вязкости конструкционных сталей от радиуса надреза образца и температуры испытания [10]: а — для стали 15Г; б — 15ХФ

ций представляет лишь теоретический интерес. Это связано с тем, что температура хрупкого перехода для образца Менаже значительно ниже, чем для образца с острым надрезом, что видно из рисунка.

Выводы

Получена аналитическая оценка соотношения удельных работ зарождения разрушения образцов Шарпи и Менаже для случая хрупкого разрушения.

Получен переходной коэффициент, позволяющий в первом приближении связать значения ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже для случая хрупкого разрушения.

Отмечены температурные особенности перехода образцов Менаже в хрупкую область по сравнению с ударными испытаниями образцов Шарпи.

1. Дядин В. П. Сопоставление значений ударной вязкости образцов Шарпи и Менаже при вязком разрушении // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 24–29.

2. Нотт Дж. Основы механики разрушения. — М.: Металлургия, 1978. — 256 с.
3. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1950. — 255 с.
4. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. — Л.: Машиностроение, 1978. — 232 с.
5. Мешков Ю. А., Пахаренко Г. А. Структура металла и хрупкость стальных изделий. — Киев: Наук. думка, 1975. — 268 с.
6. Гиренко В. С. Расширение областей применения механики разрушения при оценке трещиностойкости элементов сварных конструкций в условиях статического нагружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ. — Киев, 1997. — 35 с.
7. Ritchie R. O., Knott J. F., Rice J. R. On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel / J. of the mechanics and physics of solids. — 1973. — 21, № 6. — P. 365 — 410.
8. Tetelman A. S., McEvily A. J. Fracture of Structural materials. — New-York, 1967.
9. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. — М.: Машиностроение, — 1956. — С. 324.
10. Владимирский Т. А. К вопросу о разложении ударной вязкости на ее составляющие // Завод. лаб. — 1969. — № 5. — С. 612–615.

Поступила в редакцию
22.06.2011

ПОРТАТИВНЫЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ «МАГЭКС»

Намагничивающие устройства «МАГЭКС», разработанные Институтом электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, предназначены для намагничивания изделий при магнитопорошковом контроле конструкций из ферромагнитных материалов и их сварных соединений, а также для получения поля подмагничивания при феррозондовом контроле. Портативные устройства «МАГЭКС» просты, надежны, удобны в полевых условиях, при проведении высотных монтажных работ, при контроле качества внутренней поверхности емкостей, трубопроводов и т.п., особенно в случае повышенных требований электро- и взрывобезопасности.

Область применения намагничивающих устройств «МАГЭКС»: машиностроительный комплекс, судостроение, авиационный, железнодорожный и автомобильный транспорт, предприятия химической, газовой, нефтеперерабатывающей промышленности и энергетики.

Комплекты «МАГЭКС» обеспечивают высокую выявляемость поверхностных и подповерхностных (на глубине до 2 мм) несплошностей всех видов (уровень чувствительности А по ГОСТ 21105–87). Выпускаются в двух модификациях.

«МАГЭКС-1П» предназначен для контроля качества деталей сложной формы, например, крюков подъемных кранов, угловых сварных соединений и труднодоступных зон конструкций. Выполнено в виде двух цилиндрических разнополюсных магнитных полюсов, соединенных гибким магнитопроводом.

«МАГЭКС-2П» предназначен для контроля качества протяженных сварных соединений листовых конструкций, резервуаров, трубопроводов и пр. Намагничивающее устройство передвижное, конструктивно выполнено в виде разнополюсной колесной пары с общей ферромагнитной осью, что значительно увеличивает производительность контроля.

При несколько кратном прокатывании по поверхности детали появляется дополнительная переменная тангенциальная составляющая магнитного поля рассеяния, что повышает выявляемость дефектов.

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

e-mail: office@paton.kiev.ua





ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

В. Л. НАЙДА, Ю. А. ОЛЕЙНИК, А. Н. ГОГУЛЯ, В. А. ИГНАТЕНКО, инженеры,
(ГП «ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины»)

Изложены требования к оборудованию автоматизированного ультразвукового контроля металлургической продукции. Показан уровень оборудования, разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, а также возможные варианты развития новых систем ультразвукового контроля.

Requirements to equipment for automated ultrasonic testing of metallurgical products are described. Level of equipment developed at PWI of NASU is shown, as well as possible variants of development of new ultrasonic testing systems.

Автоматизированный ультразвуковой контроль (АУЗК) является наиболее распространенным способом НК в промышленном производстве изделий различного назначения (труб, железнодорожных колес, прутков и т. п.). Повышение требований к качеству, увеличение скорости основных технологических операций при производстве изделий, необходимость повышения информативности и достоверности контроля обусловили повышение уровня автоматизации и визуализации УЗК. Эффективность АУЗК также во многом зависит от согласованности с технологическим процессом изготовления изделий.

Современные установки АУЗК представляют собой сложные комплексы систем — механических, акустических, пневматических, гидравлических, электронных, связанных общим программным обеспечением.

К установкам АУЗК предъявляются следующие требования:

- соответствие методики АУЗК требованиям УЗ контроля, изложенным в нормативной технической документации на производство изделия;
- достоверность выявления дефектов при высокой скорости проведения контроля;
- высокая эксплуатационная надежность функционирования всех систем установки;
- удобная компоновка акустических блоков с УЗ преобразователями, позволяющая до минимума сократить время калибровки акустической системы при перевалке оборудования на выпуск изделий другого типоразмера;
- воспроизводимость результатов калибровки при повторных испытаниях в динамическом режиме на имитаторе дефектов;
- развитая система визуализации процесса контроля и его результатов;

— запись и хранение всех А-сканов от обнаруженных дефектов;

— передача результатов контроля каждого изделия в АСУ ТП цеха или завода.

Конкуренция, существующая сегодня, например, в трубной промышленности, заставляет предприятия приобретать высококачественное оборудование для УЗ контроля, отвечающее всем указанным выше требованиям.

С 2004 по 2007 гг. ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработало и поставило в Россию на ОАО «Выксунский металлургический завод» девять установок АУЗК, обеспечивающих высокий уровень контроля:

— семь установок для АУЗК сварных швов и концевых участков труб диаметром 508...1420 мм (НК 360, НК 361, НК 362);

— две установки для АУЗК железнодорожных колес (НК 364).

Показанная на рис. 1 установка НК 360 для автоматизированного УЗ контроля сварных швов труб толщиной стенки до 50 мм обеспечивает



Рис. 1. Установка НК 360 для АУЗК продольных сварных швов труб

контроль согласно требованиям API 5L, ISO 3183, DNV-OS-F101.

Несмотря на высокую скорость УЗ контроля (до 30 м/мин) используемые локально-иммерсионные акустические головки обеспечивают высокую достоверность выявления дефектов и надежный акустический контакт. Инспекторы Европейского союза, контролирующие качество труб, выпускаемых на ОАО «ВМЗ», дали высокую оценку установкам АУЗК НК 360, 361, 362М именно по причине воспроизводимости результатов контроля при испытаниях в динамическом режиме на имитаторе дефектов, а также возможности просмотра и записи А-сканов обнаруженных дефектов.

Высокие акустические характеристики имеют и УЗ блоки для контроля концевых участков труб (рис. 2).

В связи с требованиями трубных заводов об увеличении ширины зон контроля концевых участков труб до 150 мм проведена модернизация установки НК 362М. Сейчас изготавливается такая установка (НК 362МХ) для Харьызского трубного завода.

Акустическая часть установки состоит из двух последовательно работающих акустических блоков для контроля на расслоения и продольные дефекты (рис. 2).

Обеспечивается за четыре оборота трубы контроль зоны 150 мм на расслоения и продольные дефекты. Контроль проводится при расположении акустических блоков в зените трубы. Акустические блоки сконструированы таким образом, что не требуется их переналадка при переходе на другой типоразмер трубы.

Для контроля на расслоения разработан специализированный многоэлементный раздельно-совмещенный УЗ преобразователь на базе композитной пьезокерамики с наполнением 35 % (рис. 3). Частота преобразователя 5,0 МГц, диапазон контроля по толщине 2...42 мм.

Такая конструкция позволяет за один оборот контролировать зону 75 мм не нарушая требований п.п. 4.3 стандарта ISO 11496, который ограничивает максимальную ширину одиночного преобразователя, измеренную вдоль основной оси труб в размере 25 мм.

Обеспечивается равномерная чувствительность по всей ширине преобразователя.

Форма эхо-импульса такого преобразователя на образце СО2 при контактном вводе ультразвука показана на рис. 4. Длительность импульса 0,55 мкс.

Учитывая ближайшую перспективу массового изготовления железнодорожных колес с S-образным диском, была проведена доработка установки НК 364 для АУЗК железнодорожных колес, поставленной на ОАО «ВМЗ» в 2007 г., а именно создан специализированный сменный блок для УЗ контроля таких колес (рис. 5). Блок состоит из четырех акустических головок, имеющих свой электропривод.

Основной особенностью этого блока является отсутствие контакта акустических блоков с контролируемой поверхностью.

В данной конструкции осуществляется автоматическое слежение акустической головкой за профилем поверхности. Единственным соприкасающимся с колесом звеном является ролик, который поворачивается с помощью электроприводов

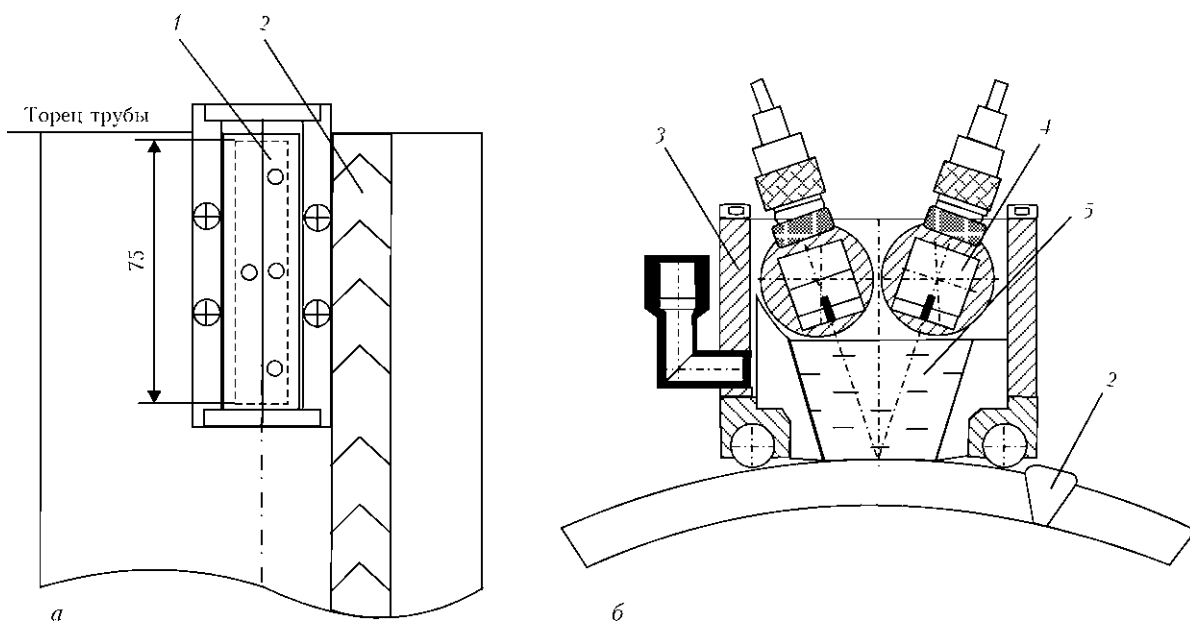


Рис. 2. Акустические блоки установки НК 362МХ для контроля на расслоения (а) и на продольные дефекты (б): 1 — акустический блок со специализированным УЗ преобразователем для контроля на расслоения; 2 — сварной шов контролируемой трубы; 3 — локально-иммерсионный акустический блок для контроля на продольные дефекты с десятью УЗ преобразователями (угол ввода ультразвука в металл 45°); 4 — иммерсионный УЗ преобразователь для контроля на продольные дефекты; 5 — локально-иммерсионная ванна (иммерсионная жидкость — вода)

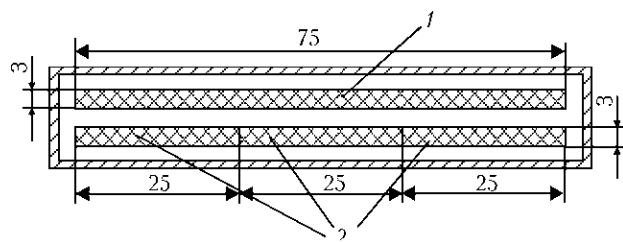


Рис. 3. Специализированный УЗ преобразователь для контроля на расслоения: 1 — пластина генератора, 2 — пластина приемника

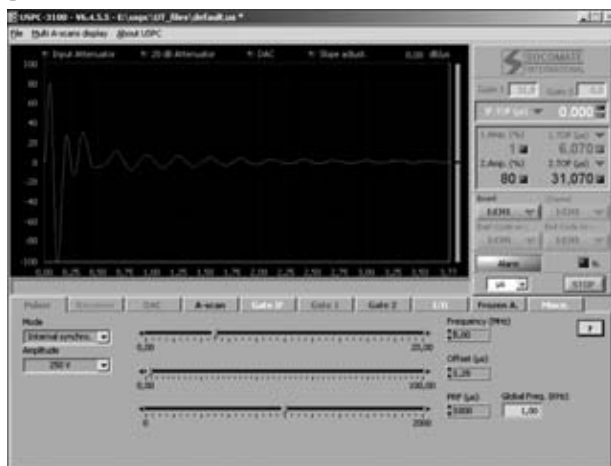


Рис. 4. Форма эхо-импульса специализированного УЗ преобразователя

вместе с корпусом датчика во время перехода на последующую дорожку.

При калибровке на имитаторе дефектов выбираются необходимые углы наклона УЗ преобразователей для установки их перпендикулярно касательной поверхности контроля в данной точке. Информация фиксируется в программе. В дальнейшем программа автоматически повторяет заданные углы при сканировании диска.

В процессе контроля на каждом шаге УЗ датчики поворачиваются электродвигателями на определя-

емый в процессе калибровки угол. Система автоматизации выполнена на базе контроллера «Siemens».

Эксплуатация нового акустического модуля на ОАО «ВМЗ» полностью подтвердила правильность выбранных технических решений.

На всех установках АУЗК использован универсальный УЗ дефектоскоп НК 363, выполненный на базе УЗ плат французской фирмы «Socomate».

Они представляют собой PCI платы полного размера для установки в шасси промышленного компьютера и предназначены для создания УЗ дефектоскопов различной сложности, что очень удобно для реализации различных задач контроля.

Непосредственно плата производит усиление, фильтрацию и оцифровку сигнала, цифровую обработку и предварительное хранение в памяти самой платы для дальнейшей передачи пакетами в ОЗУ компьютера с использованием режима DMA. Предусмотрен высокоскоростной сбор данных в режиме А-, С-скана.

Продукция «Socomate» хорошо известна (в Европе, Северной Америке, Азии, Африке) и широко используется такими известными фирмами, как «Rolls-Royce», «Pratt&Whitney» и «GE».

Система управления установками выполнена на базе универсального программируемого контроллера «Simatic S7-300» (Siemens), станций распределенного ввода/вывода ET-200 и панелей оператора OP-170 В. Обмен между участниками сети производится по шине PROFIBUS-DP.

Разработанное программное обеспечение сбора и обработки данных УЗ контроля носит универсальный характер и может выполнять требования любых задач УЗ контроля.

Реализована архивация результатов контроля с возможностью просмотра файлов данных по каждому проконтролированному объекту. В файлах данных сохраняется вся информация об обнаруженных дефектах, реализован просмотр А-сканов

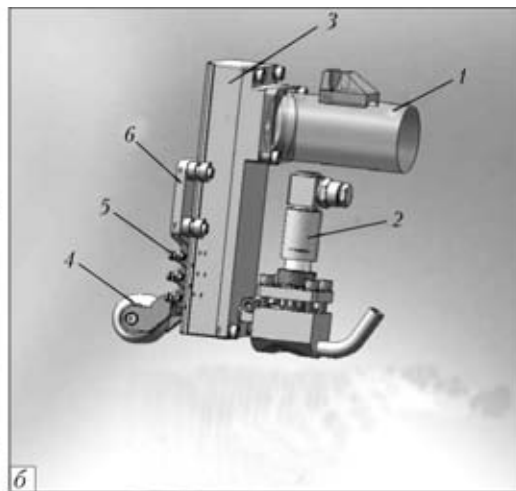
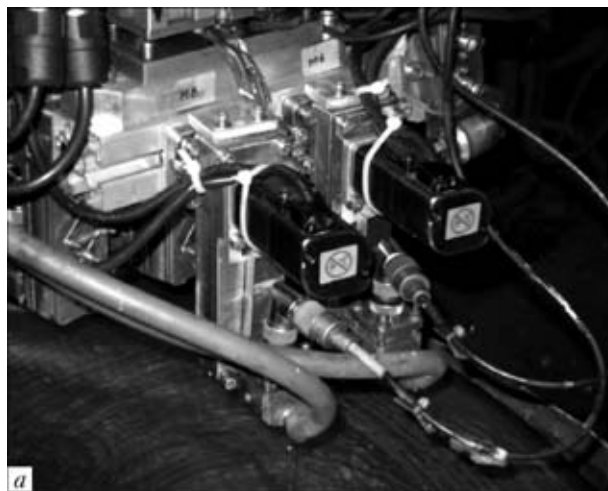


Рис. 5. Общий вид блока для контроля S-образного диска железнодорожного колеса (а) и конструкция акустической головки (б): 1 — электродвигатель с энкодером; 2 — УЗ преобразователь с угловым разъемом; 3 — направляющая-редуктор; 4 — опорный ролик; 5 — пружинный механизм; 6 — опорная пластина

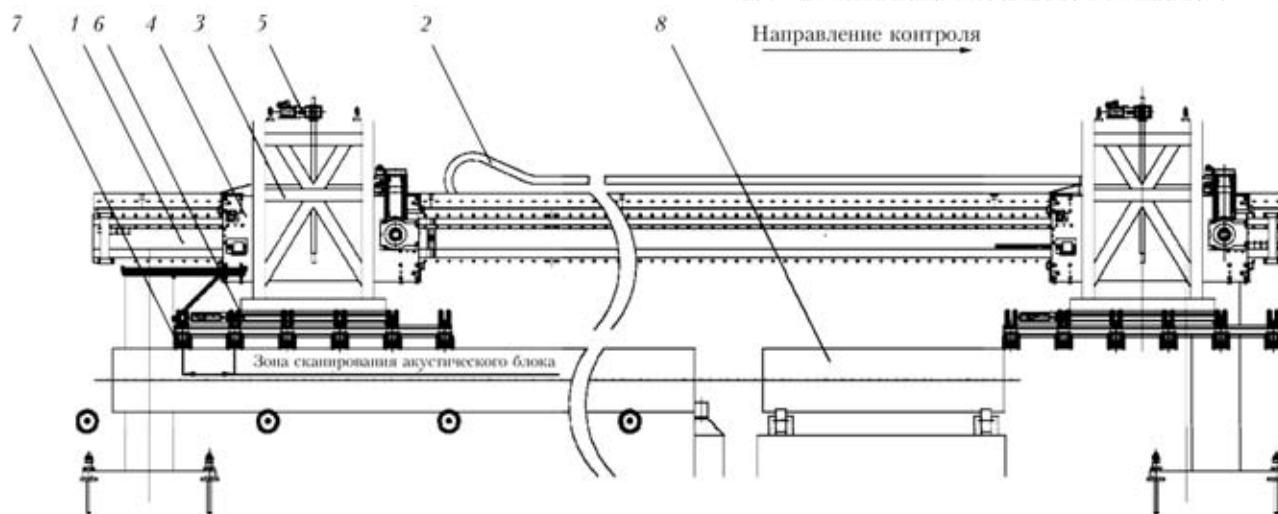


Рис. 6. Установка НК 380ВЛ для АУЗК тела труб: 1 — продольная балка с ходовой зубчатой рейкой длиной 19 м; 2 — гибкий канал для укладки электрокабелей, гидро- и пневмошлангов; 3 — траверса вертикального перемещения акустических блоков; 4 — механизм горизонтального продольного перемещения вдоль трубы; 5 — механизм вертикального перемещения с электроприводом; 6 — модуль сканирования акустических блоков; 7 — акустический блок; 8 — стандартный образец на позиции калибровки

по выбранному дефекту. Протоколы контроля каждого проконтролированного изделия передаются в систему АСУ ТП цеха.

Необходимость в удовлетворении растущих требований к скорости контроля, повышению уровня чувствительности, обнаружению разнонаправленных дефектов, надежности систем АУЗК требует новых технологических решений, например:

- применения преобразователей на основе композитной керамики, которые излучают более короткие импульсы и имеют большую абсолютную чувствительность, что обеспечит уменьшение «мертвой» зоны;

- использования систем «преобразователь+дефектоскоп» с фазированными решетками, позволяющих управлять полем преобразователя для изменения угла ввода в широких пределах с помощью электронных устройств.

Опыт эксплуатации преобразователей на фазированных акустических решетках (ФАР) показал, что при прозвучивании сварного шва или металла способом качающегося луча путем изменения угла ввода в пределах $35...70^\circ$ с дискретностью $0,5^\circ$ при тактовой частоте зондирующих импульсов, равной 1 кГц и дискретностью прозвучивания

0,5 мм (стандартное требование стандартов и методик), при параллельной работе всех каналов дефектоскопа с ФАР максимальная скорость сканирования не будет превышать 10 мм/с.

Естественно, это не устраивает производителей оборудования АУЗК. Поэтому современные автоматизированные системы с применением ФАР работают по другим принципам. При автоматизированном контроле нет необходимости формирования большого числа углов сканирования. Как правило, это несколько фиксированных углов, но все лучи формируются в одной плоскости.

Наиболее эффективной для автоматизированной системы контроля является технология на фазированных решетках FFAST II, которая позволяет провести замену нескольких одиночных УЗ преобразователей с разными углами ввода на один преобразователь на базе 2D-матричных фазированных решеток, который может формировать одновременно несколько (до 17) УЗ лучей с разными углами ввода в разных плоскостях. Эта технология обеспечивает максимально возможную производительность контроля.

Сейчас в ОКБ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разрабатывается оборудование для АУЗК тела труб с применением этой технологии.

Установка АУЗК НК 380ВЛ будет обеспечивать обнаружение дефектов типа нарушения сплошности металла в теле бесшовной трубы, дефектов типа расслоений, а также недопустимого изменения толщины стенки трубы. Диаметр контролируемых труб 146...426 мм.

При контроле обеспечивается выявление дефектов следующей ориентации (относительно образующей трубы): продольных — 0° в двух противоположных направлениях; поперечных — 90° в двух противоположных направлениях; наклонных — $22, 45$ и 67° влево и вправо относи-



Рис. 7. УЗ преобразователь ФАР системы FFAST II

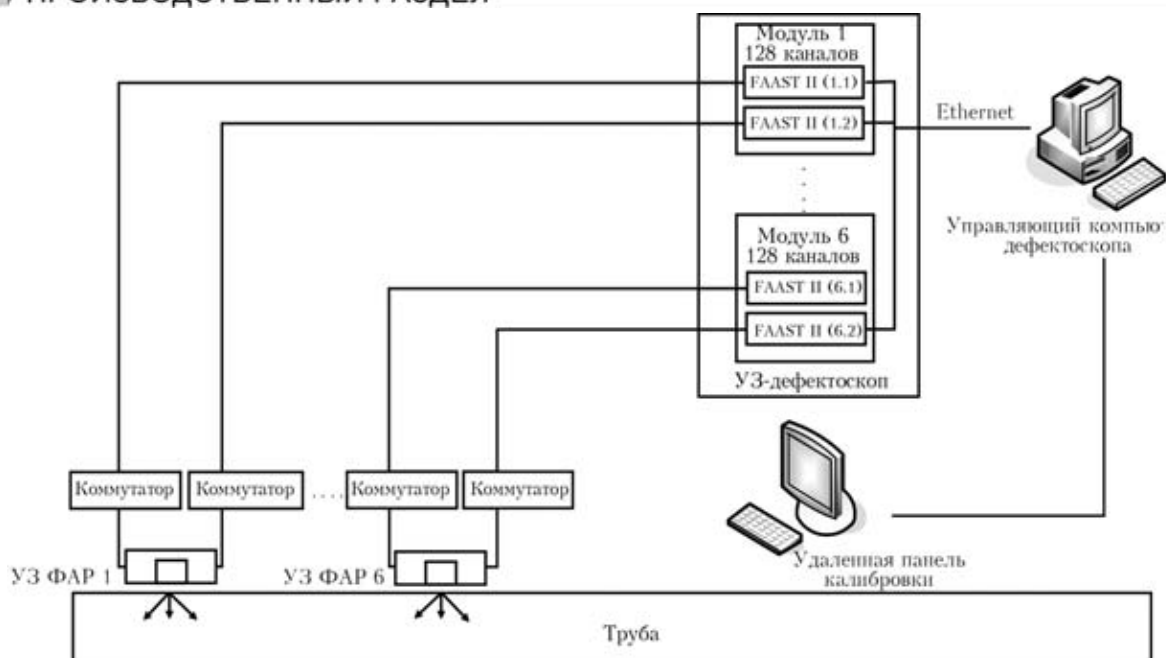


Рис. 8. Структурная схема системы FFAST II установки НК 380ВЛ

тельно образующей трубы во взаимно противоположных направлениях.

Установка обеспечивает 100 %-ную толщинометрию стенки трубы с динамической погрешностью не хуже $\pm 0,1$ мм.

Используется иммерсионный метод создания акустического контакта. Производительность контроля составляет 8...15 м/мин в зависимости от диаметра трубы.

На рис. 6 показана установка НК 380ВЛ для АУЗК бесшовных труб диаметром 146...426 мм.

Для обнаружения дефектов используются ультразвуковые преобразователи ФАР шириной зоны контроля 29 мм (рис. 7).

Количество преобразователей — 6 шт., суммарная ширина зоны контроля за один оборот трубы составляет $29 \times 6 = 174$ мм.

Преобразователь проводит одновременное прозвучивание в 17 направлениях для обнаружения продольных и поперечных дефектов в обоих направлениях; наклонных дефектов под углами 22, 45 и 67° влево и вправо относительно образующей трубы во взаимно противоположных направлениях; проведения толщинометрии и обнаружения расслоений.

Структура системы акустической части с FFAST II представлена на рис. 8.

Основные преимущества технологии FFAST II по сравнению с классической технологией ФАР:

- значительное увеличение производительности контроля;
- возможность обнаружения «косых» дефектов, что необходимо при контроле бесшовных труб;

– более низкая стоимость преобразователей и электронного оборудования по сравнению с классической технологией ФАР.

Характерной особенностью программной обработки FFAST II является возможность одновременного просмотра А-сканов каждого луча по аналогии с традиционными системами. Это привычно для операторов.

Выводы

На примерах разработок ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины показаны достижения в области создания автоматизированных средств УЗ контроля. Разработанные средства АУЗК обеспечивают высокую достоверность обнаружения дефектов и высокую эксплуатационную надежность.

Показана целесообразность применения новых технологических решений в современных установках АУЗК для обеспечения более качественного и скоростного контроля.

1. Найда В. Л., Мозжухин А. А., Лобанов О. Ф. Новое поколение оборудования для УЗК сварных труб // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 58–62.
2. Ткаченко А. А., Найда В. Л., Копылов А. П. Обеспечение надежности автоматизированного УЗК сварных труб при их производстве // В мире неразруш. контроля. — 2006. — № 3. — С. 17–20.
3. Патон Б. Е., Найда В. Л. Современное состояние и перспективы развития автоматизированного ультразвукового контроля на примере разработок ИЭС им. Е. О. Патона // Сварка и диагностика. — 2009. — № 6. — С. 30–35.
4. Пасси Г. УЗК с использованием преобразователей на фазированных решетках — способы сканирования, требования к аппаратуре и примеры практического применения // В мире неразруш. контроля. — 2011. — 2(52). — С. 51–54.

Поступила в редакцию
07.10.2011

МОНИТОРИНГ ПРОЧНОСТИ СУДНА КАК ОДИН ИЗ ПУТЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ

О. П. ЗАВАЛЬНЮК, В. Б. НЕСТЕРЕНКО (Херсонский гос. морской ин-т)

Проведен анализ аварийности на морском флоте. Подчеркивается необходимость нахождения оптимального решения для обеспечения безопасности мореплавания с позиции мониторинга технического состояния корпусных конструкций судов. Приведены и проанализированы первые результаты исследований материала корпусных конструкций судов с применением метода неразрушающего контроля по измерениям коэрцитивной силы.

Analysis of accident rate in the navy was performed. The need for finding an optimum solution for ensuring safe navigation in terms of monitoring the technical condition of ship hull structures is emphasized. The first results of investigation of ship hull structure material with application of the technique of NDT by coercive force measurements are given and analyzed.

Перевозка грузов морским транспортом занимает одно из основных мест в мировой экономике. Более 90 % мировых перевозок природных минеральных ресурсов, нефти, газа, химических продуктов, зерновых и других грузов осуществляется морским путем. Основная масса генеральных грузов в контейнерах также перевозится морем.

Громадные материальные ценности и людские ресурсы постоянно находятся в процессе перемещения на морских трассах.

Следствиями современных морских катастроф и серьезных аварий являются многочисленные человеческие жертвы, экологические проблемы, материальные потери, а также не поддающийся материальному учету психологический фактор.

Иллюстрируя ситуацию с аварийностью на морском флоте, воспользуемся данными, приведенными на XII семинаре Российского морского регистра судоходства «Качественное судоходство: стандарт XXI века. Безопасность и защита морской среды: грядущие перемены» (Санкт-Петербург, октябрь 2009).

Генеральный директор Российского морского регистра судоходства в своем докладе «Системный подход к обеспечению безопасности: тенденции и приоритеты развития» [1] представил данные, характеризующие состояние аварийности судов, зарегистрированных в реестре Российского регистра. По словам докладчика эти данные незначительно отличаются от аналогичных показателей аварийности судов мирового флота. На рис. 1 представлено распределение аварийных случаев по видам и объектам технического наблюдения.

На рис. 2 приведены результаты инспекций судов органами Государственного портового контроля (Port State Control) — органа, установленного Международной морской организацией (ИМО) для осуществления контроля заходящих в порты судов на соответствие их требованиям международ-

ных конвенций, направленных на обеспечение безопасности мореплавания.

При сравнении рис. 1 и 2 видно, что значительная доля аварий происходит из-за износа, повреждений, дефектов корпусной части судна (поч-

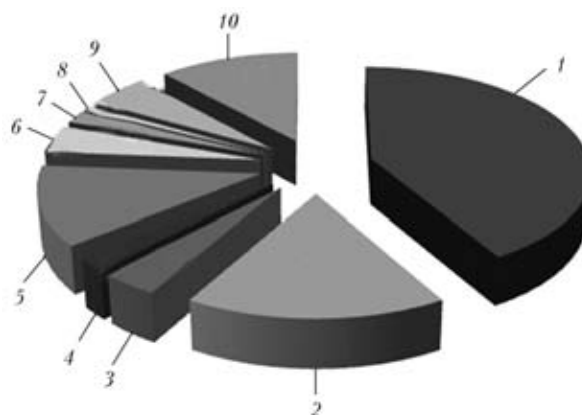


Рис. 1. Распределение аварийных случаев по видам и объектам технического наблюдения (%): 1 — корпус (41,63); 2 — главные механизмы (16,72); 3 — вспомогательные механизмы (3,73); 4 — электрооборудование (2,02); 5 — валопроводы (12,14); 6 — двигатели (4,23); 7 — рулевые устройства (1,93); 8 — якорные устройства (0,76); 9 — кораблекрушения (5,08); 10 — прочие (11,75)

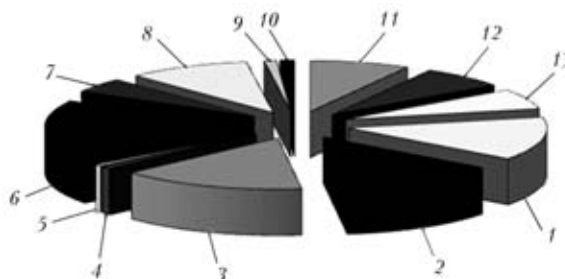


Рис. 2. Распределение несоответствий по категориям в 2008 г. (%): 1 — механические установки (14); 2 — МКУБ (13); 3 — общие вопросы безопасности (15); 4 — ОСПС (1); 5 — перевозка грузов (1); 6 — противопожарная защита (18); 7 — радиооборудование (5); 8 — спасательные средства (10); 9 — средства сигнализации (1); 10 — судовые свидетельства (1); 11 — безопасность мореплавания (8); 12 — грузмарка (7); 13 — МАРПОЛ 73/78 (6)



ти 42 %). В то же время органами портового контроля дефектов в корпусной части не выявлено, т. е. усталость металла, скрытые дефекты и износ корпуса судна, а также другие показатели скрытой угрозы безопасности судна невозможно выявить при подобном рода инспекциях. Например, на рис. 3 показана катастрофа 30-летнего судна EUROBULKER-X у причала при погрузке клинкера.

Гибель танкеров «Erika» и «Prestige» в начале нынешнего тысячелетия повлекла за собой гигантские загрязнения нефтью побережья Франции и Испании.

К сожалению, сегодня участились случаи гибели судов класса «река–море», которые сопровождаются человеческими жертвами. Подтверждением этому служит недавний случай гибели теплохода «Василий», перевозившего металл из Украины в Грузию, который затонул в 2010 г. у мыса Кыз-Аул в Черном море в условиях 5-балльного шторма: судно разломилось пополам и затонуло.

Теплоход «Basiktash» (груз — 2950 т базальта) потерпел крушение в 2011 г. в порту Сочи, в результате разлома в районе миделя.

Цель данной работы — найти оптимальные решения обеспечения безопасности мореплавания с позиции мониторинга технического состояния корпусных конструкций судов.

Результаты исследований. В течение жизни всего лишь одного поколения людей флот качественно менялся дважды. В послевоенные годы в условиях наступившего мира и подъема мировой экономики наблюдались интенсивный рост, качественное обновление и модернизация флота. Длина судов заметно выросла по сравнению с довоенными судами и достигла 160...180 м. Продольная прочность корпусов судов обеспечивалась теми нормами, которые использовались в судостроении, и вопрос контроля продольной прочности не стоял так остро, если погрузка/выгрузка выполнялась без резких отклонений от инструкций и рекомендаций судостроителей.

Следующая волна обновления морского флота происходила в 1970-е годы. Внедрение электросварки, секционного судостроения, других передовых методов строительства судов, а также разработка новых судовых двигателей, более современ-

ного машинного, навигационного, спасательного и другого оборудования позволили резко увеличить размеры судов.

Как оказалось, крупные суда более экономичны в постройке и еще более выгодны заказчикам.

Однако с увеличением длины судов неизбежно возросла их уязвимость от воздействия перегрузок на корпус за счет высокой интенсивности грузовых работ в портах погрузки и выгрузки, влияния морского волнения, вновь появившихся требований по смене балласта в море, сопровождающихся избирательной нагрузкой на отдельные участки корпуса. К примеру, интенсивность погрузки угля в порту Ричардс Бей (ЮАР) достигает 10 тыс. т/ч. Часто судовые насосы не успевают откатывать балласт и приходится останавливать погрузку. Судно типа «capesize» грузоподъемностью 150 тыс. т находится на погрузке приблизительно одни сутки. При такой интенсивности погрузки возникают значительные напряжения в корпусе, которые ведут к ускоренной деградации металла корпуса. Интенсивный процесс износа продолжается и при плавании судна в штормовых условиях. Все эти факторы нагружения, как и следующие далее, полностью отвечают малоцикловой усталости (МЦУ), причем в тяглом режиме.

Предельный возраст транспортного флота колеблется в пределах 25...30 лет и процессы деградации металла в корпусе совместно с активными коррозионными явлениями ведут к ослаблению продольной прочности корпуса судна, которая не может определяться широко известными на сегодня методами контроля прочности судна.

Комитет по безопасности на море (MSC) Международной морской Организации (ИМО) 6 июня 1994 г. представил «Рекомендации по установке систем мониторинга напряжений корпуса для повышения безопасной эксплуатации судов, перевозящих сухие грузы навалом» (MSC/Circ.646, 1994. Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems). Согласно документу [2], количество балкеров, потерпевших крушение, в конце 1980-х годов стимулирует ИМО принять различные меры к повышению уровня безопасности таких судов. Одним из таких шагов стала рекомендация ИМО судовладельцам об установке систем мониторинга прочности корпуса для обеспечения безопасности эксплуатации балкеров дедвейтом 20 и более тысяч тонн. Предполагалось, что установка таких систем необходима и на других подобных судах.

В 2010 г. в Херсонском государственном морском институте при кафедре судовождения, охраны труда и окружающей среды создана научно-исследовательская лаборатория «Безопасность грузовых и балластных операций морских судов», целью которой стало решение задачи мониторинга прочности корпуса судна при любых условиях его эксплуатации.



Рис. 3. Катастрофа судна EUROBULKER-X (сентябрь, 2000 г., Греция)

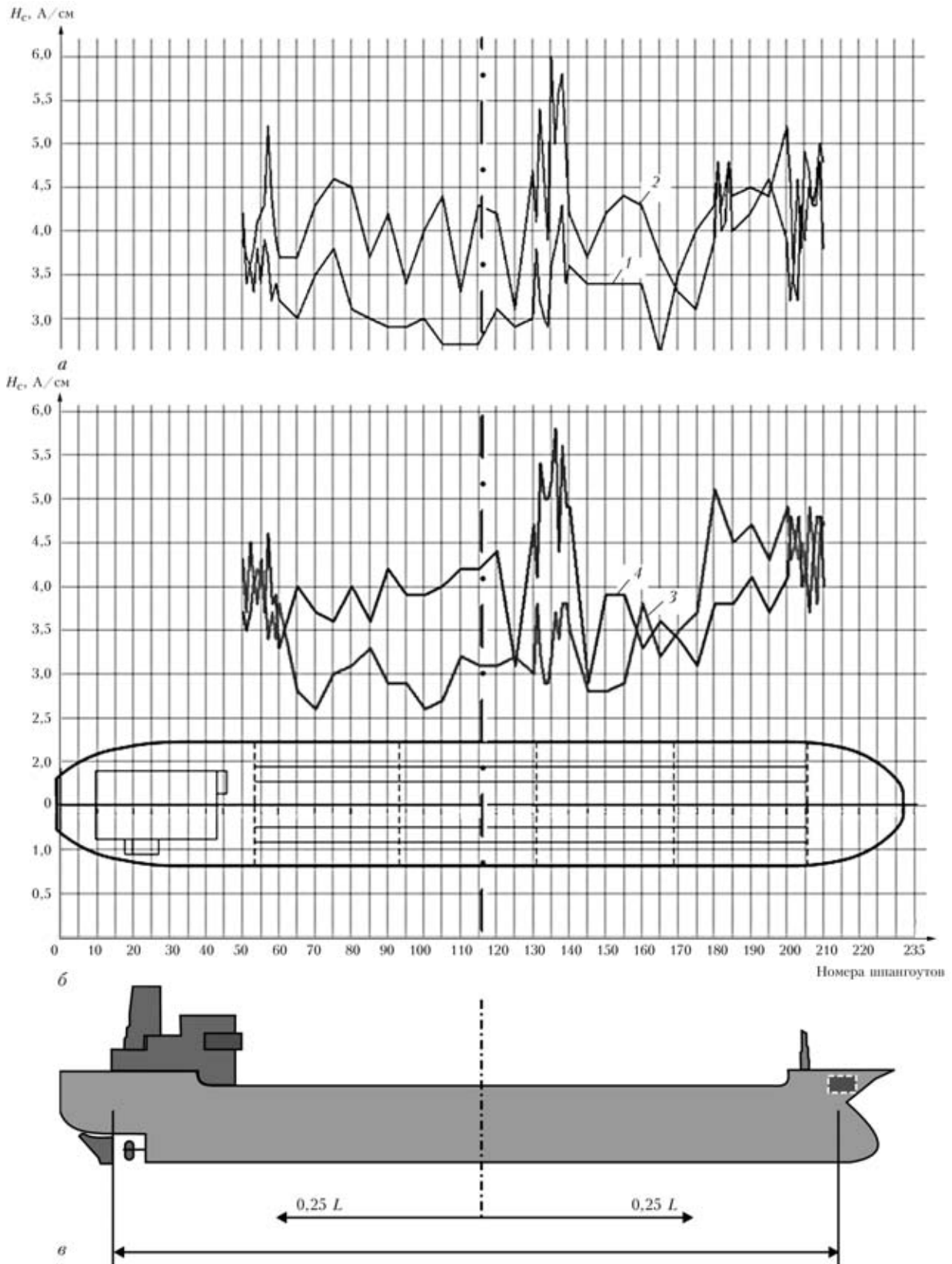


Рис. 4. Результаты замеров коэрцитивной силы на теплоходе «Сибирский-2101»: а — замеры левого; б — правого борта; в — схема предполагаемого распределения максимальных нагрузок по длине судна согласно MSC/Circ.646, 1994 [2] (1, 3 — продольные; 2, 4 — поперечные составляющие коэрцитивной силы)

Первоначально авторы статьи проводили работы в режиме поиска метода контроля продольной прочности корпуса судна, который был бы прост

и удобен для использования в судовых условиях, достаточно точен и мог бы реагировать на мгновенные изменения механических нагрузок корпу-



са судна, определять уровень деградации металла корпуса до наступления его разрушения.

Анализируя ряд методов контроля продольной прочности корпуса судна, авторы ознакомились с опытом, достигнутым в процессе выполнения европейского проекта «Ship-Inspector», а именно — применением методов дальнего действия низкочастотного УЗ контроля протяженных объектов и УЗ линейных фазированных решеток. Ознакомившись с докладами британских коллег на 18-й Международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (октябрь, 2010, Ялта), авторами было принято решение применить другие методы НК.

Во время проведения конференции был подписан договор о научно-техническом сотрудничестве с научно-производственной фирмой «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков). В результате определен метод контроля продольной прочности корпуса судна — метод неразрушающего контроля по измерениям коэрцитивной силы материала судовых корпусных конструкций.

Херсонскому государственному морскому институту для проведения научных измерений на судах был предоставлен прибор — магнитный структуроскоп (коэрцитиметр), разработанный НПП «Специальные Научные Разработки», а также возможность обмениваться информацией с фирмой, предоставляющей рекомендации по выполнению замеров, созданию методики измерений на судах и т. п.

Авторы видят своей первоначальной задачей следующее:

- адаптацию коэрцитиметра к измерениям элементов продольной прочности объектов морского транспорта;
- создание и отработку методики измерений;
- накопление опыта для сравнения результатов наблюдения судов разных по типу, проекту постройки, возрасту, усталостному состоянию корпусных конструкций и т. д.

Первые измерения были выполнены на теплоходе «Сибирский-2101», который находился в ремонте на Херсонском судостроительном заводе (судно типа река-море, место постройки — Финляндия, год постройки — 1980, длина — 128,43 м, ширина 15,63 м, водоизмещение 5293 т, дедвейт 3480 т). Объектом измерения был выбран комингс трюмов № 1–4, который простирается непрерывно от шпангоута № 50 — в кормовой части, до шпангоута № 210 — в носовой части, и является верхней несущей балкой продольной прочности.

Результаты замеров, которые были выполнены на несущих конструкциях продольной прочности корпуса судна, приведены на рис. 4.

Выводы

Целью измерений на теплоходе «Сибирский-2101» было установить места вероятного износа и усталости металла корпуса судна из-за действия изгибающих моментов во время грузовых операций и плавания в штормовую погоду, а также сравнить их с рекомендациями Комитета по безопасности на море Международной морской Организации (MSC/Circ.646).

Большие значения коэрцитивной силы, наблюдаемые в результате замеров (рис. 4), соответствуют области повышенного износа корпуса судна, что отвечает ожидаемым значениям согласно классической теории об усталости корпуса.

Кривые результатов замеров состояния продольных элементов набора корпуса показывают, что места повышенного износа корпуса исследуемого судна почти совпадают с местами, рекомендованными ИМО для установки датчиков механических напряжений, а именно: район мидельшпангоута и места, находящиеся в 1/4 длины судна от носового и кормового перпендикуляров.

Графики замеров состояния продольных элементов набора корпуса показывают, что измерения, выполненные на левом и правом бортах, отмечаются значительной симметричностью показаний, что дает все основания полагать, что полученные данные довольно близки к истинным.

Очевидно, что коэрцитиметр реагирует на деградацию металла элементов прочности продольных связей, поэтому методика НК по измерениям коэрцитивной силы для мониторинга прочности судна должна развиваться и совершенствоваться.

По мнению авторов, мониторинг прочности судна с применением метода НК по измерениям коэрцитивной силы материала судовых корпусных конструкций непременно должен снизить показатели статистики, приведенной вначале (статистика распределения аварийных случаев по видам и объектам технического наблюдения).

Сложная ситуация с экспериментальной базой, не всегда благоприятная погода, другие помехи в работе объективного и субъективного характера затрудняют проведение систематических замеров на судах и выполнение поставленной задачи.

1. <http://www.rs-head.spb.ru> — официальный сайт Российского морского регистра судоходства.
2. MSC/Circ.646. Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems, 06.06.1994. IMO.

Поступила в редакцию
22.03.2011



УДК 621.19.15

ДИАГНОСТИКА ЗАПОРНО-РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

С. А. ЕГУРЦОВ, Р. В. ПИКСАЙКИН, инж. (ООО «Газпромэнергодиагностика»), О. А. СТЕПАНЕНКО, инж. (ТюмГНГУ), РФ

Предложена методика прямого измерения расхода газа, позволяющая оценивать показатели герметичности шаровых кранов с высокой достоверностью в терминах массового расхода, что позволяет получать достоверные выводы о финансовых затратах, вызванных потерями газа при эксплуатации кранов. Разработанные технические решения, реализованные в системе, рекомендовано применять для контроля технического состояния шаровых кранов.

Direct measurement of gas flow rate used in the system, allows evaluation of air-tightness characteristics of the globe valve with a high validity in terms of mass flow rate that allows making valid conclusions on financial expenditures caused by gas losses at valve operation. The developed engineering solutions, which were realized in the system, are recommended for application to monitor the condition of globe valves.

Энергетическая стратегия РФ предусматривает дальнейшее увеличение добычи газа с одновременным ростом его удельного веса в производстве первичных энергоресурсов. Необходимы новые технологии и технические средства, базирующиеся на последних достижениях фундаментальной и прикладной науки, так как задачи по наращиванию объемов добычи и поставок газа потребителям при обеспечении приемлемого уровня промышленной безопасности в настоящее время на основе устаревших подходов решить невозможно.

Рациональная эксплуатация системы добычи и транспортировки газа может быть обеспечена при наличии всесторонней и своевременной информации о состоянии объектов единой системы газоснабжения. В связи со старением оборудования внутри- и межпромысловых трубопроводов большое значение с точки зрения обеспечения надежности транспорта газа приобретают работы в области технической диагностики.

Современные магистральные газопроводы представляют собой комплекс сложных инженерных сооружений, оснащенных различным оборудованием и автоматическими средствами управления, защиты и контроля. Надежность системы газоснабжения определяет безотказная работа запорно-регулирующей арматуры. Герметичность ее узлов является основным требованием для бесперебойной работы. Износ уплотнительных поверхностей, снижение кондиционности уплотнительных паст и смазок, нарушение уплотнительных зазоров под воздействием дисбаланса монтажных нагрузок и механические разрушения являются основными причинами нарушения герметичности. Наиболее уязвимыми, имеющими большую вероятность разгерметизации, являются узлы запорной арматуры, находящиеся в уплот-

нениях затворов и шпинделя, во фланцевых соединениях и соединительных патрубках, в сварных стыках, а также в самом корпусе.

Эффективность восстановления герметичности зависит от своевременного обнаружения разгерметизации запорного узла с оценкой уровня образовавшейся утечки, величина которой характеризует невозвратные потери товарного продукта. В связи с этим возникает необходимость формирования комплексной методологии систематического мониторинга технического состояния арматуры, основанного на методах инструментальной и дистанционной диагностики.

К инструментальной диагностике относятся такие методы индикации утечек, которые используют стандартные измерительные инструменты, внесенные в Государственный реестр, прошедшие метрологическую сертификацию и имеющие поверочный аттестат. К методам инструментальной диагностики, получившим промышленную апробацию, относятся метод теплового баланса, пневмо- и анемометрия; метод трассерной метки; измеритель герметичности; метод локализирующих камер.

Анализ имеющихся методик показывает отсутствие эффективных и простых в использовании технологии и автоматизированных средств диагностики технического состояния запорно-регулирующей арматуры, что ведет к неоправданным дополнительным потерям газа. Кроме того, большинство предлагаемых способов оценки герметичности реализует косвенные методы измерения расхода газа посредством измерения промежуточных параметров (давление, температура, уровень акустического шума и др.) В большинстве случаев данные измерения не позволяют надежно судить о численном значении расхода газа через затвор арматуры, поскольку на параметр, измеряемый косвенным способом, могут влиять факторы, не связанные с расходом газа (например, акустичес-

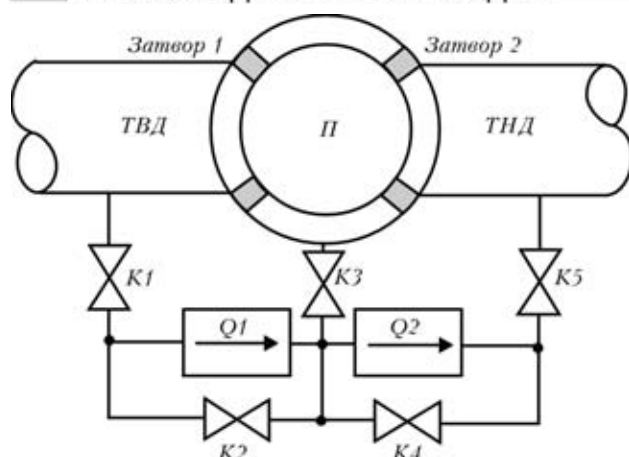


Рис. 1. Принципиальная схема измерения расхода газа через негерметичный затвор ШК

кий шум, вызванный работой технологического оборудования).

В ООО «Газпромэнергодиагностика» разработана не имеющая аналогов на рынке и в открытой литературе технология прямого измерения параметров герметичности затворов шаровых кранов (ШК) без прерывания технологического процесса транспортировки газа.

Целями разработки являются: обнаружение нарушения герметичности запорно-регулирующей арматуры, количественной оценки объемов потери газа через затвор ШК. По реализуемой системой методике осуществляется измерение расхода газа через уплотнение со стороны трубопроводов высокого (ТВД) и низкого давления (ТНД) отдельно, значения которых являются показателями герметичности уплотнений ШК. Принцип измерения иллюстрирует структурная схема, представленная на рис. 1.

Принцип измерения запатентован [1-3] и состоит в следующем. Исходное состояние – краны $K1-K5$ закрыты. На первом этапе путем открытия кранов $K1-K3$ уравнивают давление в полости ШК с давлением в ТВД. Затем кран $K2$ закрывают. При этом газ движется по пути «ТВД— $K1$ —расходомер $Q1$ — $K3$ — полость крана P — повреждение $Zatvor 2$ — ТНД». Влияние на результат измерения расхода негерметичности $Zatvor 1$ пренебрежимо мало, поскольку перепад давления между ТВД и дренажной полостью мал и проходное сечение линии измерения расхода много больше эквивалентного проходного отверстия повреждения $Zatvor 1$.



Рис. 2. Испытания системы контроля герметичности затворов ШК на кране Ду 1000 межпромышленного коллектора Уренгойского НГКМ

Аналогичным образом измеряют расход газа через $Zatvor 1$, в этом случае «работает» правое плечо схемы.

Система контроля герметичности затворов была испытана на одном из ШК Ду 1000 межпромышленного коллектора Уренгойского НГКМ (рис. 2). На основании анализа результатов испытаний установлено следующее:

- система позволяет осуществлять измерение массового расхода газа раздельно через уплотнения «высокой» и «низкой» стороны ШК с использованием прямого метода измерения расхода газа;
- реализуемая системой технология контроля герметичности затворов ШК предполагает подключение системы к ШК в трех точках: ТВД, полость ШК, ТНД;
- не требуется изменений технологического режима, врезок в трубопровод, шурфовок;
- программный комплекс системы осуществляет расчет площади эквивалентных сечений, характеризующих степень поврежденности уплотнений ШК.

1. Пат. на изобретение 2393380, РФ. Способ измерения расхода газа через негерметичный затвор закрытого шарового крана запорно-регулирующей арматуры магистрального трубопровода и устройство для его реализации / С. В. Власов, А. Н. Дудов, С. А. Егурцов и др. // ООО «Газпромэнергодиагностика». — Оpubл. 27.06.2010.
2. Пат. на изобретение 2396483, РФ. Стенд для контроля утечек газов или жидкостей в шаровых кранах магистрального трубопровода / О. Е. Аксютин, С. В. Власов, Ю. А. Горяев и др. // ООО «Газпромэнергодиагностика». — Оpubл. 10.08.2010.
3. Пат. на изобретение 2396484, РФ. Система контроля утечек газов и жидкостей в шаровых кранах магистрального трубопровода / С. В. Власов, Ю. А. Горяев, А. Н. Дудов и др. // ООО «Газпромэнергодиагностика». — Оpubл. 10.08.2010.

Поступила в редакцию
29.03.2011



ПЕРВОЕ ЗАСЕДАНИЕ СОВЕТА КИТАЙСКО-УКРАИНСКОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА

9 сентября 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (Киев) проведено первое заседание совета Китайско-украинского института сварки им. Е. О. Патона (КУИС). На нем с китайской стороны участвовали представители Департамента науки и техники провинции Гуандун, Правительства г. Гуанчжоу и Гуандунского генерального научно-исследовательского института промышленных технологий (ГГНИИ).

В процессе заседания совета КУИС рассмотрены следующие вопросы и приняты такие решения: от имени рабочих групп по подготовке проектов и организационной структуры КУИС заслушаны и одобрены отчеты руководителей рабочей группы: от украинской стороны — доктора технических наук В.Н. Коржика, от с китайской — доктора технических наук Ян Юнцян (Yang Yongqiang); утверждены Положение и Устав совета КУИС; почетными председателями совета КУИС избраны Цао Цзяньлинь — заместитель министра Министерства науки и техники КНР, и Б. Е. Патон — Президент НАН Украины, директор Института электросварки им. Е. О. Патона.

Избран совет КУИС: от китайской стороны: Гонг Гопин (Gong Guoping) — доктор технических наук, заместитель директора Департамента науки и техники Правительства провинции Гуандун; Цю Сяньян (Qiu Xianyang) — профессор, директор ГГНИИ; Чжан Десунь (Zhan Decun) — доктор технических наук, заместитель директора Департамента науки и информации Правительства г. Гуанчжоу; Лю Мин (Liu Min) — профессор, заместитель директора ГГНИИ; Ден Вейдун (Deng Weidong) — профессор, начальник отдела технологии управления ГГНИИ; от украинской сторо-

ны (ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ): Л. М. Лобанов — академик НАН Украины, заместитель директора по науке; И. В. Кривцун — член-корреспондент НАН Украины, заместитель директора по науке; Б. В. Юрлов — кандидат технических наук, заместитель директора по маркетингу и экономике; Г. С. Маринский — доктор технических наук, начальник отдела сварочных и родственных технологий в медицине и экологии; С. В. Анохин — доктор технических наук, начальник отдела физико-металлургических проблем сварки титановых сплавов и диффузионной сварки металлических материалов.

Председателем совета КУИС избран И. В. Кривцун, заместителем председателя совета КУИС — Гонг Гопин (Gong Guoping).

Избран секретариат совета КУИС (секретарь совета Цэн Лу (Zeng Lu) — начальник отдела научно-технического сотрудничества Департамента науки и техники провинции Гуандун; заместители секретаря совета Zhu Dongyan — начальник отдела коммуникации и сотрудничества Департамента науки и информации Правительства г. Гуанчжоу и Д. В. Коваленко — научный сотрудник Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ.

Утверждена дирекция КУИС: директор КУИС от китайской стороны — доктор технических наук Ян Юнцян (Yang Yongqiang), от украинской — доктор технических наук, руководитель отдела электротермических процессов обработки материалов Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ В.Н. Коржик.

Одобрены результаты работы рабочей группы по подготовке и принято решение о финансировании первой группы проектов (развитие передовых технологий сварки в производстве корпусных элементов энергетического оборудования; перспективные плазменные технологии и их применение; развитие современных технологий и оборудования для стыковой контактной сварки оплавлением и их применение в промышленности; разработка составов порошковых проволок и технологии их производства для сварки высокопрочных сталей в среде защитного газа).

Рассмотрены и одобрены предложения по тематике второй группы проектов, начало реализации которых планируется с 2012 г. В частности, поддержаны проекты по сварке живых тканей, разработке передовых лазерных технологий и оборудования, созданию новых технологий и материалов для повышения технических характеристик LED-модулей, а также другие проекты.

В. Н. Коржик, д-р техн. наук



Подписание Положения о Китайско-украинском институте сварки им. Е. О. Патона. Слева направо: Чжан Десунь (Zhan Decun) — зам. директора Департамента науки и информации Правительства г. Гуанчжоу; Гонг Гопин (Gong Guoping) — зам. директора Департамента науки и техники Правительства провинции Гуандун; академик Б. Е. Патон — Президент НАН Украины, директор Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ; Цю Сяньян (Qiu Xianyang) — директор ГГНИИ



19-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

Ежегодно в начале осени специалисты по неразрушающему контролю из Украины, России, Беларуси, Германии, Болгарии, Грузии, Литвы, Молдовы и др. стран ближнего и дальнего зарубежья собираются в Крыму на международной конференции и выставке «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики», являющейся одним из наиболее заметных событий в области неразрушающего контроля в Украине. В этом году конференция прошла с 3 по 7 октября в г. Гурзуф (Крым).

Традиционно организаторами этой конференции выступают Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (Киев) и НПП «Машиностроение» (Днепропетровск) при содействии национальных обществ неразрушающего контроля и технической диагностики Украины, России и Белоруссии, а также Института электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины (Киев) и Днепропетровского национального университета.

Поддержку конференции оказали МЧТПП «Онико» (**генеральный спонсор**), ООО «Карл Цейс», ООО «Интрон-СЭТ» (**спонсоры**), а также журналы «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «В мире неразрушающего контроля», «Сварщик», бюллетень «НК-информ».

В этом году конференция изменила ялтинскую прописку и переместилась в просторный конференц-зал санатория «Ай-Даниль», расположенного на западном краю Гурзуфской бухты.

В работе конференции приняли участие около 160 специалистов, в том числе: 107 – из Украины, 33 – из России, по 3 – из Болгарии и Литвы, по 2 – из Беларуси, Молдовы и Грузии, 1 – из Германии. 40 участников конференции представляли промышленные предприятия, 25 – вузы, НИИ и КБ, 68 – научно-производственные фирмы, 20 – экспертные и диагностические центры, а также общественные организации.

Конференцию открыл заместитель председателя УОНКТД *Мозговой А.В.*

Участников конференции в Ялте приветствовали президент Болгарского общества по НК профессор *М.Миховски*, член правления РОНКТД *О.Н.Будадин*, председатель Молдавского общества НКТД *А.А.Ткаченко*, президент Грузинского общества НКТД *Т.Р. Ригишвили*.

Всего на конференцию было представлено 9 пленарных, 49 секционных и 25 стендовых докладов о последних результатах исследований и разработок по широкому спектру проблем НК, диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций; определению физико-

механических характеристик материалов, подготовке и сертификации специалистов по НК, разработке новых и совершенствованию существующих нормативных документов НКТД и других актуальных вопросов. Тезисы докладов опубликованы в сборнике материалов конференции (электронный вариант), ознакомиться с которым можно в секретариате УО НКТД и в УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (тел./факс: (044) 573-30-40, E-mail: office@conference.kiev.ua).

В рамках конференции состоялись семинары:

- «Современные технологии магнитных методов контроля и диагностики». Руководители: Дубов А.А. (Россия), Мирошников В.В., Сучков Г.М. (Украина)

- «Об опыте сертификации специалистов НК в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов» с докладами от Украины, России, Беларуси, Германии, Болгарии, Молдовы.

Руководители семинара: А.Г. Юнацкий, Л.Г. Лукьянова (Украина), Н.Г. Медведевских (Беларусь), А.Алексиев (Болгария).

- Мастер-класс: «Качество изображения в современном световом микроскопе». Руководители: Егорова О.В., Егоров М.Ю. (Россия, ООО «КФ»Микроскоп Плюс)).

- Заседание Правления Украинского общества НКТД.

В работе выставки приняли участие представители ведущих отечественных и зарубежных фирм: МЧТПП «Онико», НПП «Машиностроение», НПФ «Ультракон», НПФ «Диагностические приборы», НПП «Интрон-СЭТ», НПФ «Ультракон-сервис», «Шерл», Lap GmbH Laser, ФГУП «ВИАМ», ООО НПО «Дискрет», ООО «Мелитэк-Украина», ООО НТЦ «Промтехнологии», ЧП «Девайсиз Групп Украина», ООО «ДДАП-РАКС», МПФ «Малад», ПП «Газприлад», ООО «Нева Технолоджи», ЗАО «Тирасстром», НИИНК АО «Интроскоп», ОАО «НПО «Энергомаш им. академика В. П. Глушко».

По общему мнению участников конференция прошла на высоком научно-техническом уровне. Успешной работе конференции способствовали прекрасные условия санатория «Ай-Даниль», замечательная крымская природа, яркое солнце и теплое Черное море.

Ждем Вас на 20-й юбилейной конференции в 2012 г.

*А.В.Мозговой, НПП «Машиностроение»,
Днепропетровск
З. Ю.Главацкая, УИЦ «НАУКА.ТЕХНИКА.
ТЕХНОЛОГИЯ.», Киев*



Во время проведения конференции в Гурзуфе



**Специалисты отдела №4 ИЭС
“Неразрушающие методы контроля
качества сварных соединений”
выполняют:**

работы по неразрушающему контролю
и технической диагностике
промышленных объектов
и конструкций (методы: ультразвуковой,
магнитный, радиографический,
капиллярный, вихретоковый, тепловой)

разработку технологических решений
по неразрушающему контролю,
изготовление и сопровождение внедрения
необходимого оборудования

ремонт, настройку, поверку
дефектоскопического оборудования

изготовление и аттестацию
испытательных образцов

консультирование, подготовку,
аттестацию и сертификацию персонала,
занимающегося испытаниями

издание книг, пособий, журналов, бюллетеней,
информационных материалов



Оказываем необходимую помощь:

в проведении прочностных, усталостных
и коррозионных испытаний

в выполнении химического, спектрального,
металлографического и структурного
анализа металлов

в анализе и обосновании условий
безопасной эксплуатации
различных конструкций

в разработке необходимого компьютерного
программного обеспечения для мониторинга
технического состояния объектов
и различных технологических процессов

За необходимой информацией обращайтесь:

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины
Украина, 03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11
e-mail: office@paton.kiev.ua



К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ А. А. КАЗИМИРОВА



24 октября известному ученому в области сварных конструкций, бывшему заместителю директора Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины кандидату технических наук, лауреату Государственной премии СССР, Премии Совета Министров

БРСР и Премии им. Е. О. Патона АН УССР исполнилось бы 100 лет.

После окончания Киевского строительного техникума А. А. Казимиров работал на предприятии «Дніпроколгоспбуд» в Днепропетровске, потом на предприятии «Райкопзерно» в Новомосковске. В 1930–1935 гг. учился в Киевском инженерно-строительном институте.

Инженерная и научная деятельность Александра Андреевича Казимирова связана с ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, где он прошел путь от инженера до заместителя директора института (1959–1984 гг.). До 1987 г. возглавлял отдел сварочных напряжений и деформаций института.

Свыше 50 лет А. А. Казимиров занимался исследованиями прочности и разработкой технологии изготовления сварных конструкций. Еще перед Великой Отечественной войной он начал изучать характер деформаций и напряжений, которые возникают во время сваривания, и исследовал эту проблему на протяжении многих лет.

В года войны А. А. Казимиров принимал участие в усовершенствовании сварных конструкций танковых корпусов и других видов военной техники, организации серийного выпуска сварных танковых корпусных конструкций с широким использованием автоматической сварки под флюсом. После войны он продолжил начатые прежде работы по сварке в судостроении.

Занимался исследованиями по усовершенствованию корпусных конструкций, разработке новых технологических процессов и способов поточного, секционного-блочного строительства корпусов судов. Изучал механизм образования сварочных деформаций и разрабатывал мероприятия по избежанию вредного влияния деформаций и напряжений в листовых конструкциях.

А. А. Казимиров сделал весомый вклад в решение проблем механизации сварочных работ, повышения технологичности сварных конструкций, разработку новых технологий и создание оборудования для сборки и сварки металлических конструкций. Уделял много внимания проблемам уменьшения металлоемкости машин и оборудования.

Особенно нужно отметить его исследования, посвященные вопросам дифференциации конструкционных сталей по их прочности для более эффективного использования реальных свойств проката черных металлов.

Александр Андреевич занимался вопросами прочности, конструктивного оформления, точности изготовления элементов в узлах решетчатых и балочных конструкций из сталей повышенной и высокой прочности, тонкостенных оболочек и шарообразных конструкций из сталей, титановых, алюминиевых и других сплавов. Подготовил несколько кандидатов технических наук, является автором более 150 научных статей и авторских свидетельств.

А. А. Казимиров был награжден орденами Трудового Красного Знамени и Дружбы народов, многими медалями, а также Почетной Грамотой Президиума Верховной Рады УССР.

Светлую память о Александре Андреевиче навсегда сохраняют его ученики, сотрудники и все, кто его знал.

ПОДПИСКА — 2012

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн.	320 грн.	900 руб.	1800 руб.	26 дол. США	52 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



РЕКЛАМА в журнале

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

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

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 7.11.2011. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклеек.

Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.