

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 4, 2003

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.),
И. П. Белокур, Ю. К. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,
Н. В. Новиков, Е. С. Переверзев,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учанин, А. А. Улитко,
А. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
Т. М. Шве́ц, И. Я. Шевченко

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев -150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 261-58-81,
Факс: (044) 268-34-84, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Электронная верстка

А. И. Сулима, И. Р. Наумова,
И. В. Петушков

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 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

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

К 85-летию Бориса Евгеньевича Патона 3

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ПАТОН Б. Е., ЛОБАНОВ Л. М., НЕДОСЕКА А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра 6
ГАРФ Э. Ф. Особенности проектирования металлических конструкций из труб 11
ГИРЕНКО В. С., РАБКИНА М. Д., ГИРЕНКО С. В. Физико-механические изменения в сталях при эксплуатации в водородосодержащих средах 18
НЕДОСЕКА С. А. Контроль линии синтеза аммиака системой АЭ диагностики ЕМА-ЗУ 24
СКАЛЬСЬКИЙ В. Р. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії 29
НЕДОСЕКА А. Я., АГАРКОВ С. В., ОВСИЕНКО М. А., ХАРЧЕНКО Л. Ф., ЯРЕМЕНКО М. А. Акустико-эмиссионный контроль в нефтехимическом производстве 37

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ И НОРМАТИВНАЯ БАЗА

ГРУЗД А. А., БАЖЕНОВ А. К., АНДРЕЕВ С. А. Подготовка и аттестация специалистов и разработка нормативной базы в направлении деятельности «Техническая диагностика сварных конструкций» 40
БЕЛЫЙ Н. Г., ТРОИЦКАЯ Н. В. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии (новые национальные стандарты) 42

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Академії наук України — 85 років 47
Международная школа-семинар «Акустико-эмиссионные технологии и ресурс» 47
ДЕФЕКТОСКОПИЯ — 2003, Санкт-Петербург 48
Міжнародна науково-практична конференція-виставка «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж» 50
ГОРДЕЛИЙ В. И. Конструкция и особенности работы ЭМА-систем УД-ЭМА-РСР-01, работающих в установках для контроля старогодных рельсов 54
КОЗИН А. Н. Метод течеискания Spectroline — что это такое? 58
Выставки, конференции 60

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации "Техническая диагностика и неразрушающий контроль" ТКУ-78



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 4, 2003

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.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko, N. V. Novikov,
E. S. Pereverzev,
P. P. Prokhorenko, V. P. Radko,
I. Ya. Shevchenko,
A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo,
A. Ya. Teterko, V. N. Uchanin,
A. F. Ulitko, T. M. Shvets,
N. N. Zatsepin,
A. V. Shimanovsky

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 261-58-81,
Fax: (38044) 261-34-03, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Electron galley:

I. R. Naumova, A. I. Sulima,
I. V. Petushkov

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

85th birthday anniversary of Boris Evgenyevich Paton 3

TECHNICAL DIAGNOSTICS

PATON B. E., LOBANOV L. M., NEDOSEKA A. Ya. Technical
diagnostics: present, past and future 6
GARF E. F. Features of design of tubular metal structures 11
GIRENKO V. S., RABKINA M. D., GIRENKO S. V. Physico-mechanical
changes in steels in service in hydrogen-containing media 18
NEDOSEKA S. A. Monitoring of an ammonia synthesis line with AE
diagnostic system EMA-3U 24
SKALSKY V. R. Evaluation of accumulation of bulk damage in solids,
based on acoustic emission signals 29
NEDOSEKA A. Ya., ARAGKOV S. V., OVSIENKO M. A.,
KHARCHENKO L. F., YAREMENKO M. A. Acoustic-emission
monitoring in petrochemical production 37

SPECIALIST TRAINING AND STANDARDS

GRUZD A. A., BAZHENOV A. K., ANDREEV S. A. Training and
certification of specialists and development of standards in the field
of «Technical diagnostics of welded structures» 40
BELIJ N. G., TROITSKAYA N. V. Classification of film systems
for industrial radiography (new national standards) 42

NEWS AND INFORMATION

85 years of the Academy of Sciences of Ukraine 47
International Workshop «Acoustic-Emission Technologies
and Residual Life» 47
DEFECTOSCOPY-2003, St.-Petersburg 48
International Scientific-Practical Exhibition-Conference «Corrosion protection
and monitoring the residual life of industrial buildings, constructions
and engineering supply lines» 50
GORDELIJ V. I. Design and operating features of EMA-systems UD-EMA-
RSP-01, used in the units for control of used rails 54
KOZIN A. N. Spectroline flaw detection method — what is it? 58
Exhibitions, conferences 60

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board

К 85-летию Б. Е. ПАТОНА

БОРИС ЕВГЕНЬЕВИЧ ПАТОН — выдающийся ученый в области сварки, металлургии и технологии металлов, имеющий мировую известность и признание. Он — автор многих основополагающих исследований и созданных на их основе высоких технологий; блестящий организатор науки, видный государственный и общественный деятель. На протяжении 50-ти лет он руководит академическим Институтом электросварки им. Е. О. Патона Национальной АН Украины. С 1962 г. Б. Е. Патон — бессменный Президент Украинской Академии наук, развитию актуальных и перспективных научных направлений которой он отдает свои знания, энергию и талант. Весомая роль НАН Украины в развитии общества и государства, науки и образования, обороноспособности и народного хозяйства.

Высокий авторитет Б. Е. Патону создали исключительная способность продуцировать идеи и добиваться их реализации, разносторонняя и необычайно плодотворная научная деятельность, неизменное стремление направить глубокие научные изыскания на решение приоритетных проблем экономики. В Борисе Евгеньевиче удивительно сочетаются широкий диапазон научно-технических интересов и глубина их познания с исключительным трудолюбием и высокой требовательностью, отзывчивостью и заботливым отношением к людям.

Борис Евгеньевич родился 27 ноября 1918 г. в семье профессора Евгения Оскаровича Патона, заведующего кафедрой мостов Киевского индустриального института (в настоящее время НТУУ «КПИ»), широко известного к тому времени специалиста в области мостостроения. В 1929 г. Е. О. Патон был избран действительным членом Академии наук УССР, а в 1934 г. основал Институт электросварки, ныне носящий его имя.

В 1941 г. Борис Евгеньевич окончил Киевский политехнический институт. В 1941–1942 гг. по направлению вуза работал инженером электротехнической лаборатории завода «Красное Сормово» в г. Горьком (ныне Нижний Новгород). Начало его научной деятельности приходится на 1942 г., когда он стал младшим, а затем старшим научным сотрудником Института электросварки. Лаборатории института в годы Великой Отечественной войны были перенесены непосредственно в цеха Нижнетагильского завода на Урале, где велось производство сварных корпусов танка Т-34.

После возвращения Института электросварки в г. Киев Б. Е. Патон в 1945 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Анализ работы сварочных головок и способов их питания при сварке под флюсом», а в 1952 г. — доктора технических наук по теме «Исследование условий устойчивого горения сварочной дуги и ее регулирование». В 1951 г. был избран членом-корреспондентом, а в 1958 г. — действительным членом (академиком) Академии наук УССР. С 1962 г. Борис Евгеньевич является действительным членом Академии наук СССР (с 1992 г. — Российской академии наук).

С 1953 г. и по настоящее время Борис Евгеньевич возглавляет Институт электросварки имени Е. О. Патона НАН Украины, который под его руководством вырос в крупный научно-технический комплекс с развитой структурой, включающей собственно исследовательский институт, конструкторско-технологические и экспериментальные подразделения, три опытных завода, а также такие инновационные структуры, как технопарк, научно-инженерный и учебно-аттестационный центры. Б. Е. Патона как ученого, организатора науки и руководителя крупного института отличает исключительная способность предвосхитить развитие тех перспективных тенденций научных исследований, результаты которых играли и играют решающую роль на различных этапах технического прогресса.



Для научных разработок, выполняемых коллективом института по инициативе и при участии его руководителя, характерна органическая неразрывность фундаментальных и прикладных исследований и высокая степень завершенности результатов и их широкая практическая реализация. Этому способствует знаменитая патоновская традиция тесного творческого содружества ученых различных направлений и специалистов-производственников, крепких партнерских отношений института с предприятиями ведущих отраслей промышленности и строительства.

Наиболее оригинальные и широко применяемые результаты исследований Б. Е. Патона связаны с разработкой прогрессивных технологий неразъемного соединения и обработки металлов и неметаллов в различных условиях и средах (в атмосфере, в вакууме, под водой, в космосе и др.). К ним относятся сварка и наплавка под флюсом, сварка в защитных газах сплошной и порошковой проволокой, электрошлаковая сварка, стыковая сварка оплавлением, газотермическое напыление, лучевые технологии, включая разработку специальных расходных и функциональных материалов, соответствующего оборудования и систем автоматического управления технологическими процессами.

Фундаментальные исследования Б. Е. Патона и его учеников в области взаимодействия сварочных источников нагрева (электрической дуги, шлаковой ванны, низкотемпературной плазмы, электронного и лазерного лучей) с расплавленным металлом заложили основу для создания новой отрасли металлургии — специальной электрометаллургии. Сюда входят технологии рафинирующего переплава и литья особо чистых специальных сталей и сплавов, цветных металлов, технологии получения методом испарения и конденсации в вакууме уникальных композиционных материалов, а также материалов и заготовок со специальными покрытиями. В настоящее время академик Б. Е. Патон активно работает над решением актуальной проблемы создания и получения перспективных конструкционных и функциональных материалов XXI века.

Борис Евгеньевич внес большой вклад в создание новых типов высокоэффективных сварных конструкций, отвечающих современным (повышенным) требованиям эксплуатационной надежности, долговечности и технологичности при изготовлении. Школой академика Б. Е. Патона разработаны и внедрены в народное хозяйство индустриальные способы сооружения с помощью сварки магистральных трубопроводов, крупногабаритных резервуаров для хранения нефти, кожухов доменных печей, высотных башенных конструкций и др.

Непосредственно под руководством академика Б. Е. Патона за прошедшие десятилетия подготовлен и реализован ряд государственных программ по подъему технологического уровня производства в тяжелом, энергетическом и транспортном машиностроении, судостроении, производстве авиакосмической техники и других наукоемких отраслях на основе широкого применения в производстве сварных конструкций, высоких сварочных технологий и прогрессивных конструкционных материалов. В нынешних, сложных для народного хозяйства, условиях Б. Е. Патон прилагает значительные усилия для решения актуальных проблем оценки и продления ресурса сварных конструкций и сооружений, создания эффективных методов и средств их контроля и технической диагностики.

Академик Б. Е. Патон первым начал и развил исследования в области космических технологий и конструкций; результаты ряда из них успешно прошли экспериментальную отработку при орбитальных полетах космических кораблей и в условиях открытого космоса. Будучи руководителем этих пионерских исследований и разработок, он и сегодня является признанным в мире лидером в этой области.

Огромное внимание проявляет Борис Евгеньевич к проблеме подготовки научных кадров высокой квалификации, профессиональной подготовке и переподготовке инженерно-

технических работников и их аттестации в соответствии с международными и национальными стандартами и нормами сварочного производства.

В исследования и технологии, выполненные и разработанные Б. Е. Патон, значительный вклад внесен его соратниками, коллегами и многочисленными учениками известной школы патоновцев, а также учеными и специалистами других научных направлений и широким кругом производителей Украины, России, других стран СНГ и многих зарубежных государств.

Б. Е. Патон прилагает большие усилия для сохранения и укрепления творческих связей и деловых контактов между учеными и производителями разных стран, развивает такие новые формы научно-технического сотрудничества, как комплексная реализация международных программ, организация совместных лабораторий и предприятий, широкий обмен информацией. Возглавляемый Борисом Евгеньевичем Институт электросварки является членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации.

Б. Е. Патон — член Международного комитета по научно-техническому развитию стран СНГ, возглавляет Межгосударственный совет по сварке и родственным технологиям, является председателем Координационного совета межгосударственной программы «Высоконадежный трубопроводный транспорт», членом правления Международной топливно-энергетической ассоциации и членом попечительского совета Международного фонда ядерной безопасности.

О диапазоне международной и общественной деятельности Б. Е. Патона свидетельствует то, что он является Президентом Международной ассоциации академий наук, почетным Президентом Международной инженерной академии, членом Европейской академии и Международной академии технологических наук, почетным членом Международной академии наук, образования, индустрии и искусства, Международной астронавтической академии, Римского клуба, почетным доктором ряда крупнейших университетов и иностранным членом академий и научно-технических обществ многих стран.

Борис Евгеньевич удостоен многочисленных научных наград и дипломов, среди которых Золотая медаль М. В. Ломоносова АН СССР, Золотая медаль Л. Лозанна Ассоциации металлургов Италии, медаль акад. С. И. Вавилова АН СССР, Золотая медаль им. В. Г. Шухова Союза инженеров и научно-технических обществ России, Золотая медаль Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС), премия им. В. Вернадского фонда интеллектуального сотрудничества «Украина — XXI век» и другие.

Б. Е. Патон — лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, заслуженный деятель науки и техники УССР, заслуженный изобретатель СССР, дважды Герой Социалистического Труда, Герой Украины; среди его наград — ордена Ленина, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, За заслуги перед Отечеством, орден Князя Ярослава Мудрого и др. отечественные и зарубежные ордена и медали.

Технический комитет Украины по стандартизации № 78 «ТДНК», редакционная коллегия и редакция журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», широкий круг ученых, специалистов и производителей, занятых в сфере технического контроля и неразрушающего контроля сердечно поздравляют Бориса Евгеньевича с юбилеем и желают крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов в его неустанной многогранной деятельности!



ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

Б. Е. ПАТОН, Л. М. ЛОБАНОВ, А. Я. НЕДОСЕКА

Мы стоим на пороге существенных изменений в управлении эксплуатацией машин, оборудования, конструкций и сооружений. Близится время, когда можно будет в любой момент определить состояние конструкции и прогнозировать ее поведение в будущем. Необходимо помнить, что начало этим исследованиям, подходам к решению инженерных задач распознавания состояний, к их реализации заложено трудами и деятельностью многих отечественных и зарубежных ученых.

We are on the threshold of essential changes in control of operation of machines, equipment, structures and facilities. Close is the time, when it will be possible to determine at any moment the condition of a structure and forecast its behaviour in the future. It should be remembered, that the efforts and activity of many local and foreign scientists laid the foundations for these investigations, approaches to solving engineering tasks of condition identification and to their realization.

Прошло уже более 30 лет со дня организации и начала работ по созданию теории, методов и средств технической диагностики (ТД) сварных конструкций и материалов в нашей стране. На протяжении этих лет выполнен огромный объем работ, создана, по сути, новая технология контроля состояния конструкций, разработана и серийно выпускается необходимая для этих целей аппаратура, созданы соответствующие организационные структуры для приведения в действие всего механизма обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. Интересен путь, пройденный с момента зарождения проблемы и до сегодняшнего дня.

Работы по созданию теории и методов оценки и прогнозирования работоспособности конструкций у нас в стране начали координироваться организованным Государственным комитетом СССР по науке и технике в 1963 г. при Институте электросварки им. Е. О. Патона АН Украины Научным советом по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции». В составе секции «Сварные конструкции» Научного совета начала функционировать рабочая группа № 3 «Техническая диагностика и точность сварных конструкций» (рис. 1).

В начале своей деятельности рабочая группа сосредоточила основное внимание на традиционном вопросе технологии производства сварных конструкций — вопросе обеспечения их точности. Создание такой группы в то время диктовалось необходимостью координации и целевого финансирования научно-исследовательских и конструкторских работ ученых и специалистов страны по созданию способов учета отрицательного влияния сварочного процесса на геометрические размеры конструкций. Особенно большие неприятности сварочные деформации доставляли при изготовлении крупногабаритных листовых конструкций, сварных станин металлорежущих станков, которые начали приходить на смену литым, при изготовлении рамных конструкций, держащих высокоточные крупногабаритные элементы (например, зеркала радиотелескопов).

Необходимо было более глубокое целенаправленное изучение этих процессов с учетом начавшегося бурного развития электронно-вычислительной техники. Изучение механизма явлений, связанных с процессом сварки и приводящих к потере конструкцией основной (расчетной) формы равновесия, позволило получить важные теоретические результаты и основанные на них методы и средства борьбы с короблением сварных конструкций. Однако другим, не менее важным достижением этих исследований стали работы, появившиеся вначале как сопутствующие основным, а затем ставшие самостоятельными — работы по оценке состояния материала конструкции. Последние, базирующиеся на вычислительной технике, позволяли совершенно по-новому взглянуть на одну из важнейших проблем техники — проблему обеспечения безопасности эксплуатации сварных конструкций.

Результаты первых исследований показали, насколько сложна разрабатываемая проблема. Назрела необходимость выделения этого направления



Рис. 1. Председатель ГКНТ СССР академик В. А. Кириллин знакомится с работами ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины в области точности и технической диагностики сварных конструкций (Киев, 1973 г.)

в самостоятельное с тем, чтобы можно было сконцентрировать усилия ученых и разработчиков на решении целого ряда проблем, возникших при более тщательном анализе. Нужно было сократить время научного поиска и получить более качественные результаты. И в 1978 г. принимается решение о необходимости более глубокого изучения проблемы оценки состояния материалов конструкций, а уже в следующем 1979 г. в составе Научного совета по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции» приступила к работе новая секция «Диагностика надежности сварных конструкций».

В работе секции приняли участие крупные академические и отраслевые научно-исследовательские институты, вузы и промышленные предприятия страны, в деятельности которых существенное место занимали вопросы обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, предприятия и организации, выпускающие или причастные к выпуску конструкций, повреждения которых могли привести к серьезным экологическим последствиям. Это, в первую очередь, Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, ЦНИИТМАШ, КБ «Южное», ЦНИИ им. академика Крылова, ЦНИИ «Прометей», Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), ЦНИИМаш и Хабаровский филиал ВНИИФТРИ Госстандарта СССР, НИИ технологии машиностроения, ЦНИИМатериалов, НИИ «Квант», Черноморский судостроительный завод, Северное машиностроительное предприятие, ВНИИНК, представившие практически все основные отрасли народного хозяйства страны.

Академические институты и высшие учебные заведения представляли: Институт металлофизики АН Украины, Институт проблем машиностроения АН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона АН Украины, Институт гидродинамики АН Украины, Киевский политехнический институт и Киевский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, а также МВТУ им. Н. Э. Баумана, Московский инженерно-физический институт, Харьковский политехнический институт и Харьковский государственный университет, НИИ математики и механики при Ростовском университете.

К 1983 г. объем работ, выполняемых в области ТД, существенно возрос и Академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона АН Украины принимают необходимые меры для более четкой организации и планирования таких работ, контроля за ходом их выполнения. Так, в 1983 г. на базе лаборатории по ТД сварных конструкций создается структурный отдел ИЭС того же направления, а спустя некоторое время при Президиуме Академии наук создается Научный совет по проблеме «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», в составе которого начали работать более 20 институтов и организаций. С этого момента работы в области ТД эксплуатирующихся конструкций начинают носить целевой планируемый характер.



Рис. 2. Заседание рабочей группы СЭВ по ТД. В заседании принимают участие представители Болгарии, Венгрии, Польши, Украины, Чехословакии и Югославии (Киев, ноябрь 1983 г.)

К началу 1982 г. круг специалистов, работающих в области ТД, расширился за счет стран-членов СЭВ. Образовавшаяся рабочая группа для выполнения новой совместной темы «Разработка, исследование и применение средств акустической диагностики сварных конструкций» объединила усилия специалистов из Болгарии, Венгрии, Советского Союза, Польши, Румынии, Чехословакии и Югославии для решения этой важной проблемы. Центром рабочей группы становится Институт электросварки им. Е. О. Патона АН Украины, уже возглавивший работы по этому направлению у нас в стране (рис. 2).

Интенсивное развитие работ потребовало и более интенсивных обменов результатами исследований, чем те, которые обеспечивала секция Научного совета по сварке. В 1986 г. начинают работать Всесоюзный методологический семинар по вопросам технической диагностики, созданный при Президиуме Академии наук Украины, и международная школа «Акустическая эмиссия в диагностике предразрушающего состояния и прогнозировании разрушения сварных конструкций», первое заседание которой состоялось в октябре 1986 г. в г. Варна (Болгария) на базе Комбината контрольно-сварочных работ (КЗУ) (рис. 3). Работа школы была прервана на 17 лет и лишь в 2003 г. школа возобновила свою работу заседанием в г. Будапеште на базе Университета Св. Иштвана (см. цв. вклейку, рис. 4).



Рис. 3. Участники первой международной школы по ТД (Варна, октябрь 1986 г.)



Одним из существенных достижений методологического семинара явился прогноз разработок в области создания методов и средств диагностики на промышленной основе. В частности, рассматривались два метода диагностирования материалов — на основе глубоких фундаментальных исследований и на основе статистических данных. Был сделан вывод, что в первом случае на базе применения методов квантовой механики разрушения аппаратура и методики ее применения (при сохранении начатого в 1986 г. темпа научно-исследовательских и практических работ) будут созданы к 2010 г. По второму методу результаты работ следует ожидать в 1995 г. Как показала жизнь, выводы семинара подтвердились созданием в 1993 г. диагностической аппаратуры семейства ЕМА: появилась первая диагностическая система ЕМА-1.

На рис. 5 представлена схема прогноза завершения работ по ТД материалов начиная с 1986 г. Интересно отметить, что на основании достаточно сложного механизма прогноза все же правильно было предусмотрено время появления серийных диагностических систем, работающих по второму методу. Трудность прогноза заключалась в том, что необходимо было предусмотреть развитие не только собственно теории диагностирования, но и развитие смежных отраслей знаний и соответствующей техники, на базе которых осуществлялись разработки. Это — возможности вычислительной техники, способной обработать в сжатое время достаточно большие потоки информации, поступающей с контролируемой поверхности изделий, и измерительной техники, такой, как датчики и измерительные приборы, которая была бы в состоянии предоставить на вход вычислительной машины достаточную по требованиям теории и точности измерения информацию. На схеме условно показаны все три ветви прогнозируемых разработок.

Недостаточное количество специалистов в области диагностики материалов в условиях постоянно растущих требований к прочности и надежности конструкций вызвало необходимость организации их планомерной подготовки. Рассматривая эту проблему как одну из составных частей проблемы обеспечения надежности и безопасности эксплуатации конструкций и учитывая, что подавляющее большинство их изготавливается с применением



Рис. 5. Схема прогноза завершения работ по ТД материалов

сварки, Секция ТД принимает решение о необходимости организации подготовки специалистов в области ТД на базе крупных учебных центров страны. Начиная с 1990 г., совместными усилиями Секции, Института электросварки им. Е. О. Патона АН Украины и Киевского политехнического института при ряде вузов страны, включая КПИ, на базе специальности «Оборудование и технология сварочного производства» создается новая специализация 12.05.04 «Диагностика и прочность сварных конструкций». Специализация предусматривала подготовку специалистов достаточно широкого профиля для работы в области диагностики технического состояния и прогнозирования ресурса сварных конструкций. Однако в связи с распадом СССР, созданная структура так и не приступила к работе в полном объеме.

Более широкому обмену мнениями в области разработок по ТД способствовало появление ежегодного республиканского межведомственного сборника «Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций», первый номер которого вышел в 1985 г. Сборник издавался четыре года и в свет вышли четыре номера. В 1989 г. на смену этому сборнику пришел периодический ежеквартальный всесоюзный научно-теоретический журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», который с 1993 г. становится международным. Журнал приобрел широкую известность и популярность как у нас в стране, так и за рубежом. Уже первый номер журнала переиздавался в полном объеме в Великобритании на английском языке, что позволило привлечь к его тематике специалистов всех стран, говорящих на английском языке. Журнал начали выписывать многие библиотеки и организации Западной Европы, США и Японии.

Работа, проводимая рабочей группой СЭВ, к 1988 г. увенчалась разработкой первого опытного прибора для диагностики материалов на базе метода акустической эмиссии (АЭ). Это еще не была диагностическая система, хотя прибор выполнял достаточно много диагностических функций. Первый четырехканальный прибор конструкции Венгерского Института по ядерным исследованиям КФКИ с математическим обеспечением разработки ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины появился на внутреннем рынке Украины и стран СНГ в 1989 г. Испытания этого прибора осуществлялись при исследовании зарождения и развития дефектов в процессе нагружения трубчатых элементов морских стационарных платформ.

Испытания показали высокую эффективность прибора. Зарождающиеся дефекты обнаруживались на микроуровне, когда скопления дислокаций только начинали образовывать область, где в дальнейшем должна была появиться и привести к разрушению конструкции трещина. Продолжение испытаний показало, что трещина образуется именно в том месте, на которое указала аппаратура. Аппаратура стала входить в практику работ предприятий и организаций страны.

Однако время шло, и появились дополнительные данные о процессах, протекающих в мате-



риалах при их деформировании. На повестку дня встал вопрос о необходимости создания более совершенных методов и аппаратуры для диагностики состояния материалов конструкций и сооружений.

Распад СССР серьезно изменил распределение сил и работ в направлении ТД. Заметно старели конструкции, ослабело внимание к ним со стороны персонала. Необходимо было срочно принимать меры по совершенствованию методов и технологий контроля. Нужно было знать фактическое состояние конструкций, чего не могли дать традиционные методы оценок. Начинать необходимо было с учебы персонала. С конца 1994 г. на базе ИЭС им. Е. О. Патона



Рис. 6. Первый выпуск слушателей курсов подготовки специалистов по ТД (Киев, декабрь 1994 г.)

НАНУ начинают действовать курсы подготовки специалистов по ТД для лиц, работающих в различных областях промышленности (рис. 6). Сейчас подготовка персонала приобрела более специализированный характер и осуществляется совместно с Главным учебно-методическим центром Государственного комитета по надзору за охраной труда в Украине. Специалисты готовятся по двум направлениям — общая диагностика конструкций и сооружений и диагностика на основе АЭ, приобретающей все более широкую популярность (см. цв. вклейку, рис. 7).

К началу 1993 г. появляется новая, более совершенная модель диагностической аппаратуры — системы диагностики семейства ЕМА (Evaluation of Material Ability). Полученные разработки заинтересовали руководителей промышленных предприятий, и возникла потребность в создании центра, который бы явился специализированным переходным звеном между промышленностью и государственными органами, издающими нормативную документацию по методам регламентных испытаний конструкций. Потребовались совместные усилия трех ведомств — Госстандарта Украины, Госназдорхрантруда Украины и Академии наук Украины, чтобы объединить комплексные достижения ученых и специалистов с главными законообразующими органами Украины с целью повышения уровня работ предприятий по контролю за состоянием эксплуатации конструкций и сооружений. В результате в 1993 г. был создан Технический Комитет по стандартизации № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль (ТК-78 «ТДНК»)). Созданный Комитет приступил к работе во всех отраслях промышленности и стал оказывать большую помощь Украинскому комитету по надзору за охраной труда в Украине в деле обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. В составе комитета были созданы рабочие подкомитеты, к управлению которыми были привлечены ведущие специалисты отраслей. Структурная схема ТК-78 «ТДНК» пока-

зана на рис. 8. Работа комитета привела к появлению служб ТД на промышленных предприятиях.

Опыт контроля состояния конструкций мобильными диагностическими системами показал некоторые недостатки в таком подходе. Отсутствие непрерывной информации о работоспособности конструкций приводило к необходимости выполнения достаточно сложных расчетов для принятия решения о возможности продолжения их дальнейшей эксплуатации. Появилась необходимость в разработке систем непрерывного контроля. Такие системы были созданы и непрерывный мониторинг стал реальностью. Созданная уникальная технология контроля и аппаратура на ее основе позволили малым количеством датчиков осуществить непрерывный долгосрочный стопроцентный контроль больших поверхностей конструкций. Это была большая победа. Первая диагностическая система такого профиля была смонтирована и запущена на Одесском припортовом заводе при контроле крупногабаритных хранилищ аммиака (см. цв. вклейку, рис. 9). Следует отметить еще одну особенность разработанной технологии контроля, ис-

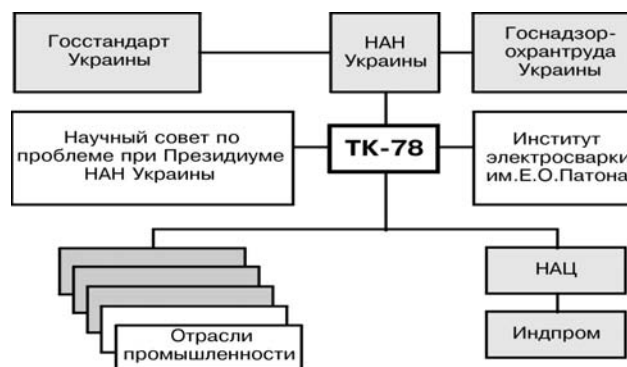


Рис. 8. Схема Технического комитета № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль (ТК-78 «ТДНК»)), направление — техническая диагностика (НАЦ — Национальный аттестационный центр в области ТД; Индпром — базовое предприятие)



пользующей возможности передачи информации через Интернет. Такая технология позволила перенести управление контролем в единый аналитический центр и использовать высококвалифицированных специалистов в области ТД и других специальностей для выработки более качественных решений о состоянии контролируемых конструкций (см. цв. вклейку, рис. 10).

С 2000 г. появляются системы диагностики, позволяющие прогнозировать разрушающую нагрузку конструкций на ранних стадиях разрушения, прогнозировать их остаточный ресурс. Указанные технологии использовали сложный математический аппарат на базе теории распознавания образов и стали основой диагностической техники. Эта техника начинает широко применяться на предприятиях Украины. На рис. 11 (цв. вклейка) показан момент контроля оборудования химического завода, выполнявшийся в момент пуска производства. При этом традиционные методы контроля не проводились, что позволило совместить контроль оборудования с пуско-наладочными работами и резко сократить время пуска за счет ликвидации обычных методов контроля.

В ноябре 2000 г. по инициативе Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины при Президиуме Национальной академии наук Украины создан научно-координационный центр по вопросам ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин. Специалистами различных отраслей промышленности, входящими в состав Совета, был проведен анализ состояния конструкций, сооружений и оборудования основ-

ных отраслей промышленности Украины и на его базе подготовлена записка. Эти материалы в дальнейшем были рассмотрены на заседании Межведомственной комиссии по вопросам научно-технологической безопасности при Совете национальной безопасности и обороны Украины и переданы в Администрацию Президента, который дал соответствующие поручения Правительству для разработки комплекса государственных мероприятий направленных на улучшение существующей ситуации.

Мы привели краткую характеристику развития работ в области ТД материалов конструкций и организационных структур, направляющих и координирующих эти работы, за сравнительно короткий промежуток времени, когда ТД зародилась и начала развиваться как самостоятельное направление. Необходимо отметить, что ТД конструкций на практике уже приобрела свойственные ей характерные черты. Уже нет путаницы между понятиями неразрушающего контроля и технической диагностики. На практике используется достаточно строгая методология, на ее базе создана и успешно применяется соответствующая аппаратура. Непрерывно совершенствуются технология диагностики и оборудование, которые к настоящему времени достигли такого уровня, при котором применение их на практике приводит к существенному экономическому эффекту. Интенсивно развивается непрерывная диагностика (мониторинг), которая будет оказывать все более существенное влияние на себестоимость продукции, что станет весомым фактором при конкуренции на рынке.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев*

*Поступила в редакцию
15.09.2003*



ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТРУБ

Э. Ф. ГАРФ

Рассмотрены особенности проектирования решетчатых металлических конструкций из цилиндрических труб, определяемые спецификой напряженно-деформированного состояния и прочности сварных узловых соединений. Показано, что условия снижения массы элементов конструкций и обеспечения прочности узловых соединений зачастую прямо противоположны, в связи с чем оптимальные решения могут быть достигнуты путем расчета узловых соединений на действующие статические и периодические нагрузки. Изложены современные методики оценки прочности узлов из труб с непосредственным примыканием элементов при статическом и многоцикловом нагружении, разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

The paper deals with the features of design of latticed metal structures of cylindrical pipes, determined by the specifics of the stressed-strained state and strength of welded connections. It is shown that the conditions of lowering the weight of the structural elements and provision of the strength of connections are often quite opposite, so that optimal solutions may be found by designing the connections for acting static and periodical loads. Modern procedures are described of evaluation of the strength of tubular connections with directly abutted elements under static and high-cycle loading, developed at the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

Известно, что применение цилиндрических труб в стержневых системах имеет ряд преимуществ, реализация которых позволяет при прочих равных условиях на 15...20 % снизить массу металла. Наиболее существенными с точки зрения снижения массы конструкций являются повышенные геометрические характеристики сечений и снижение внешних воздействий на конструкцию при ветровой и волновой нагрузках. В ряде случаев важным преимуществом конструкций из труб является снижение затрат на их эксплуатацию.

Вместе с тем, рациональное использование труб в конструкциях требует учета ряда особенностей при их проектировании. В качестве иллюстрации

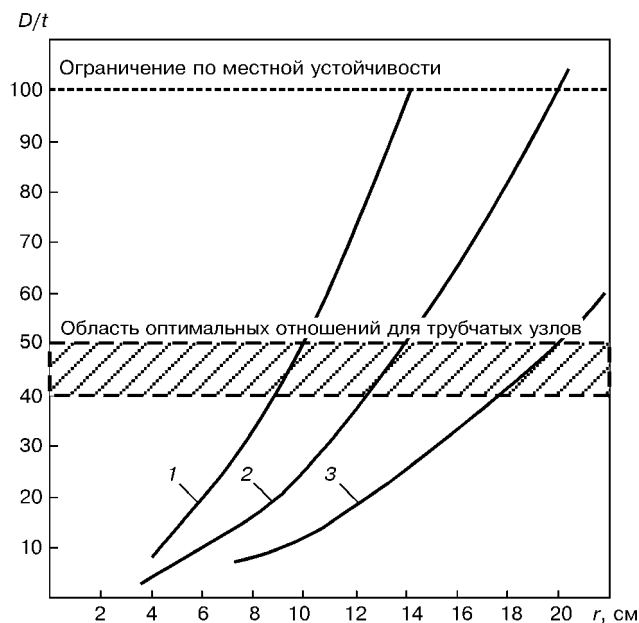


Рис. 1. Зависимость радиуса инерции от отношения D/t для площади поперечного сечения трубы, см²: 1 — 50; 2 — 100; 3 — 200

© Э. Ф. Гарф, 2003

на рис. 1 для ряда трубчатых сечений представлена зависимость радиуса инерции сечения от его тонкостенности, выраженной отношением диаметра к толщине стенки (D/t). Из рисунка видно, что эффективность использования в сжатых элементах конструкции трубчатых сечений существенно зависит от тонкостенности и возрастает с ростом последней. Однако рост тонкостенности трубчатого сечения должен быть ограничен критерием местной потери устойчивости. Расчеты показывают, что при равномерном распределении сжимающих напряже-

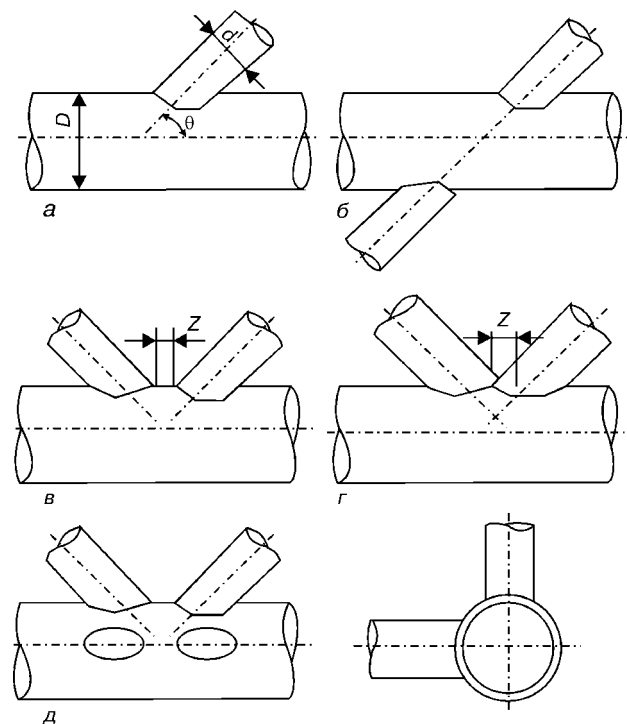


Рис. 2. Конструктивные решения узлов с непосредственным примыканием элементов решетки к поясу: а — Т-узел; б — Х-узел; в, г — К-узлы соответственно с непересекающимися и пересекающимися элементами решетки; д — пространственный узел



ний по сечению опасность местной потери устойчивости отсутствует при значениях $D/T \leq 100$. В случае неравномерного распределения напряжений по сечению местная потеря устойчивости может иметь место при существенно меньших значениях тонкостенности.

В стержневых конструкциях из труб особое внимание следует уделять узловым соединениям. При этом целесообразно рассматривать технологический, конструктивный и прочностной аспекты проектирования узлов. С позиций технологии выполнения соединений несомненное преимущество имеет сварка. Она позволяет выполнить соединение без дополнительных элементов, т. е. с наименьшими затратами металла при минимальной трудоемкости. С позиций конструктивного оформления узловых соединений наибольшими преимуществами обладают узлы с непосредственным примыканием элементов (рис. 2). Такие узлы имеют относительно равномерное распределение напряжений в сечениях элементов, примыкающих к узловому соединению, исключают, как правило, наличие дополнительных конструктивных элементов, и имеют сравнительно высокую прочность [1]. Важно также и то, что прочность узловых соединений с непосредственным примыканием элементов достаточно хорошо изучена как при статическом, так и при циклическом нагружении, и может быть определена расчетным путем. С позиций прочности узловых соединений необходимо рациональное конструктивное оформление узлов, выбор оптимальных геометрических параметров элементов и служебных свойств материалов.

Следует отметить, что узловые соединения в конструкциях из труб являются наиболее ответственными элементами, зачастую предопределяющими прочность всего сооружения, поэтому их проектированию и расчету необходимо уделять особое внимание [2].

За предельное состояние трубчатого узла при статическом нагружении принимают разрушение или деформирование участка поясного элемента под действием усилия в примыкающем к поясу элементе решетки. Расчет на прочность выполняется последовательно на действие расчетных сочетаний усилий в каждом элементе решетки рассматриваемого узла. Расчетные сочетания усилий в элементах определяются статическим расчетом конструкции. Если условие прочности не выполняется хотя бы для одного из элементов решетки, то прочность узла в целом считается не обеспеченной. На практике в большинстве случаев не представляет труда установить ограниченное количество элементов решетки в узле, для которых выполнение условий прочности обеспечивает прочность узла. Это же касается и выбора наиболее нагруженных узлов в конструкции.

В общем случае в элементе решетки пространственной конструкции у места его примыкания к поясу действуют: продольное усилие (P), изгибающий момент, направленный в плоскости, определяемой рассматриваемым элементом решетки и поясом (M_b) и изгибающий момент, направленный из плоскости узла (M_c).

Вероятностно статистический анализ значительного количества результатов натурных испытаний трубчатых узлов в широком диапазоне изменения их геометрических, конструктивных и прочностных параметров позволил получить выражение для расчета статической прочности узлов решетчатых конструкций из труб:

$$\sigma^D = \frac{(D/T)^{0,8} (d/D)^{0,2}}{K_\gamma d T} \times \left[\frac{|P|}{11,42 K_\phi K_p m K_\theta} + \sqrt{\left(\frac{M_b}{9,31 d K_b} \right)^2 + \left(\frac{M_c}{4,91 d K_c} \right)^2} \right] \leq R_y \gamma_c. \quad (1)$$

Здесь D и T — соответственно наружный диаметр и толщина стенки поясной трубы; d — наружный диаметр элемента решетки; σ^D — эффективные напряжения в поясе, вызываемые действием усилий в элементе решетки; K_γ — коэффициент, учитывающий изменение прочности узла в зависимости от отношения наружного диаметра раскоса к наружному диаметру пояса (d/D); K_θ , K_b , K_c — коэффициенты, учитывающие влияние на прочность узла угла наклона раскоса к поясу при нагружении соответственно P , M_b , M_c ; R_y — расчетное сопротивление материала поясной трубы; γ_c — коэффициент условий работы, отражающий влияние на прочность узла пластических свойств стали поясной трубы; K_ϕ — коэффициент, учитывающий влияние на прочность типа и конструктивных особенностей узла, а также характера его нагружения; K_p — коэффициент, учитывающий знак продольной силы в рассматриваемом и рядом расположенном элементах решетки; m — коэффициент, учитывающий влияние на прочность узла знака и уровня напряжений, действующих в поясной трубе со стороны рассматриваемого элемента решетки.

Коэффициенты в формуле (1) определяются из следующих выражений:

$$K_\gamma = \frac{1,56}{d/D(5 - 4d/D)} \text{ при } d/D > 0,625; \quad (2)$$

$$K_\gamma = 1,0 \text{ при } d/D \leq 0,625; \quad (2a)$$

$$m = 1 + 0,4 \sigma_p / R_y, \quad (3)$$

если на участке пояса со стороны рассматриваемого примыкающего элемента действуют напряжения сжатия ($\sigma_p \leq 0$) и $m = 1,0$, если $\sigma_p > 0$;

$$K_\theta = (\sin \theta)^{-1,5}; K_b = (\sin \theta)^{-0,75}; K_c = (\sin \theta)^{-1,5}, \quad (4)$$

где θ — угол между осями пояса и рассматриваемого раскоса, $\theta \leq 90^\circ$;

$$K_p = 1,9 - 0,9d/D, \quad (5)$$

если в рассматриваемом элементе решетки действует растягивающее усилие $P \geq 0$ и $K_p = 1,0$, если $P < 0$;

$\gamma_c = 1,0$, если отношение предела текучести стали поясной трубы к его временному сопротивлению разрыву $\sigma_T / \sigma_b \leq 0,7$. Если $\sigma_T / \sigma_b > 0,7$, то $\gamma_c = 0,9$.


 Таблица 1. Значение конструктивного коэффициента K_Φ для трубчатых узлов.

Тип узла	Эскиз узла	Выражение для определения K_Φ	Примечание
T-узлы		$K_\Phi = 1,0$	—
X-узлы		$K_\Phi = 0,8$	—
K-узлы с непересекающимися раскосами		$K_\Phi = 1,0 - \frac{P_{cm} \sin \theta_{cm}}{P \sin \theta} (0,5 - 2Z/D)$	P_{cm} и P с учетом знака. При $Z/D > 0,25$ принимать $Z/D = 0,25$
K-узлы с пересекающимися раскосами		$K_\Phi = 1,0 - 0,5 \frac{P_{cm} \sin \theta_{cm}}{P \sin \theta}$	P_{cm} и P с учетом знака
		$K_\Phi = 1,5$	При проверке по формуле (7)

При разработке выражения для определения значения K_Φ в качестве критерия принят T-узел, для которого $K_\Phi = 1,0$. Статистический анализ результатов испытаний показывает, что для X-узлов $K_\Phi = 0,8$. Для K-узлов K_Φ зависит от расстояния между носками раскосов — Z , точнее от отношения этого расстояния к диаметру пояса и соотношения вертикальных составляющих усилий в рассматриваемом и рядом расположенном раскосе. Выражения для определения K_Φ в зависимости от конструктивного решения плоских узлов представлены в табл. 1, где приняты следующие обозначения: P_{cm} — продольная сила в примыкающем элементе, смежном с рассматриваемым и расположенным в одной с ним плоскости; θ_{cm} — угол между поясом и примыкающим элементом, смежным с рассматриваемым и расположенным в одной с ним плоскости, $\theta_{cm} \leq 90^\circ$; Z — минимальное расстояние между рассматриваемым и смежным примыкающим элементом по образующей пояса.

В случае пересекающихся элементов решетки, узел следует выполнять так, чтобы один из элементов (большого диаметра) был приварен к поясу по всему периметру сопряжения. Значение продольной силы в рассматриваемом элементе следует принимать равным $P + \Delta P$, где ΔP — усилие, которое передается на рассматриваемый элемент со смежного через участок взаимного сопряжения и определяется из выражения:

$$\Delta P = P_{cm} K_s^d \frac{\sin \theta_{cm}}{\sin \theta}. \quad (6)$$

При этом должно выполняться условие, согласно которому рассматриваемый элемент решетки способен воспринять усилие ΔP , т.е.

$$|P_{cm}| \leq \frac{11,42 d_{cm} t K_\Phi K_p K_\gamma R_{yd}}{(d/t)^{0,8} (d_{cm}/d)^{0,2} K_\theta}. \quad (7)$$

Если это условие не выполняется, то значение P_{cm} в формуле (6) следует определять по правой части формулы (7).

В выражениях (6) и (7) приняты следующие обозначения: ΔP — дополнительная продольная сила, условно передаваемая со смежного раскоса на рассматриваемый; K_s^d — коэффициент, учитывающий часть сечения смежного раскоса, соответствующую участку его пересечения с рассматриваемым; t и R_{yd} — соответственно толщина стенки и расчетное сопротивление материала рассматриваемого раскоса; d_{cm} — диаметр смежного элемента, частично пересекающегося с рассматриваемым. Коэффициенты K_p , K_γ , K_θ в формуле (7) определяются в предположении, что роль пояса выполняет раскос, на который частично опирается смежный элемент.

При расчете прочности узла с пересекающимися элементами решетки на усилие в элементе, частично примыкающем к поясу, частично к смежному элементу, должно выполняться условие:

$$\sigma_D K_s^D + \sigma_d K_s^d \leq K_s^D R_y + K_s^d R_{yd}, \quad (8)$$

где σ_D — напряжение, определяемое по формуле (1) в предположении, что рассматриваемый элемент примыкает только к поясу; σ_d — напряжение, определяемое по формуле (1) в предположении, что рассматриваемый элемент примыкает только к смежному элементу, который в данном случае выполняет роль пояса; R_y и R_{yd} — соответственно расчетное сопротивление материала пояса и примыкающего элемента, на который опирается рассматриваемый элемент.

Коэффициенты K_s^D и K_s^d определяются из выражений:

$$K_s^D = S^D / \pi d, \quad K_s^d = S^d / \pi d, \quad (9)$$



где S^D и S^d — длины дуг окружностей сечения рассматриваемого элемента, соответствующие участкам пересечения его с поясом и со смежным элементом; при этом $K_s^D + K_s^d = 1,0$.

Аналогичная идеология используется при расчете узлов с тремя примыкающими элементами.

Приведенный подход позволяет оценить влияние отдельных параметров на прочность трубчатых узлов. Наиболее существенное влияние оказывает толщина стенки поясного элемента. Прочность узла линейно связана с пределом текучести материала пояса. Прочность узлов возрастает с увеличением соотношения диаметров раскоса и пояса. Для K -образных узлов их прочность возрастает с уменьшением расстояния между носками раскосов ($Z/D \leq 0,25$), но при условии разных знаков усилий в элементах решетки. С увеличением угла примыкания раскоса к поясу вне зависимости от вида нагружения прочность узлов снижается.

Нетрудно видеть, что требования к геометрическим параметрам элементов с позиций прочности узлов и снижения общей массы конструкции в ряде случаев прямо противоположны. В этой связи одним из условий оптимального проектирования конструкций из труб является максимальное снижение массы отдельных элементов при обязательном обеспечении прочности узловых соединений. Поэтому необходимость обеспечения прочности узловых соединений требует, как правило, ограничения тонкостенности трубчатых элементов $D/T = 40 \dots 50$ (см. рис. 1).

Ряд решетчатых конструкций в процессе эксплуатации подвергаются циклическому нагружению. К ним в первую очередь относятся морские стационарные платформы, башни, мачты и пр. Сопротивление усталости таких конструкций в большинстве случаев определяется наиболее нагруженными узловыми соединениями. Это объясняется неравномерностью напряженного состояния вдоль линии сварных соединений и по толщине металла в узлах, а также наличием концентрации напряжений в зоне перехода от сварного шва к основному металлу.

Многочисленные исследования [3–5 и др.] свидетельствуют о том, что зарождение усталостного разрушения в трубчатых узлах всегда имеет место по границе перехода от сварного шва к основному металлу в зонах с наиболее высоким уровнем рабочих напряжений в так называемых горячих точках, расположенных на наружной поверхности. В зависимости от геометрических размеров пояса и раскоса трещина усталости может зарождаться либо в элементе пояса, либо в элементе решетки, поэтому расчет на усталость трубчатых узлов должен выполняться отдельно для пояса и для раскоса.

Общепринятые методики оценки сопротивления усталости сварных соединений [6, 7] неприемлемы для трубчатых узлов в силу особенностей их напряженно-деформированного состояния в зоне сварных соединений. Поэтому методики оценки сопротивления усталости трубчатых узлов основаны на обобщении результатов натурных испытаний

узлов и имеют ряд отличий, связанных с выбором параметра нагруженности узла, характеризующего его сопротивление усталости вне зависимости от геометрических и конструктивных параметров, а в ряде случаев и вида нагружения.

Заметим, что при оценке сопротивления усталости трубчатых узлов в качестве параметра нагруженности используют либо размах напряжений, либо размах нагрузки, исходя тем самым из предположения, что коэффициент асимметрии цикла нагружения не оказывает существенного влияния на сопротивление усталости трубчатых узлов в достаточно широком диапазоне долговечностей. Правомочность такой предпосылки подтверждается анализом результатов испытаний и объясняется, видимо, тем, что концентрация напряжений в «горячих точках» в сочетании с остаточными напряжениями создает в трубчатых узлах условия, при которых максимальные напряжения цикла в зоне соединения всегда достигают предела текучести стали, из которой изготовлен узел.

Важным является и то, что сопротивление усталости трубчатых узлов практически не зависит от механических свойств стали. Поэтому применение сталей повышенной и высокой прочности в трубчатых конструкциях, работающих на усталость, требует определенной осторожности и обязательной проверки расчетом, так как предполагает соответствующий уровень рабочих напряжений в узлах.

В мировой практике существуют различные подходы к оценке сопротивления усталости трубчатых узлов [8–10]. Остановимся на одном из них, имеющем, по нашему мнению, определенные преимущества в части диапазона геометрических параметров и конструктивных решений узлов. Он основан на подходе к оценке долговечности трубчатых узлов с позиций эффективных напряжений [11]. Значения размахов эффективных напряжений от динамических усилий в элементах узла определяются согласно выражениям, полученным для оценки статической прочности, но с учетом некоторых особенностей, связанных с циклическим нагружением узлов и местами зарождения усталостного разрушения. В частности при определении размаха эффективных напряжений при расчете на усталость трубчатых узлов не учитывается уровень номинальных напряжений в поясе и знак усилия в раскосе. С учетом сказанного размахи эффективных напряжений в поясе от различных силовых воздействий определяются из выражений:

$$2\sigma_a^D = \frac{(D/T)^{0,8}(P_{\max} - P_{\min})}{12,57K_\phi K_\gamma K_\theta d T (D/d)^{0,2}}, \quad (10)$$

$$2\sigma_a^D = \frac{(D/T)^{0,8}(M_{b\max} - M_{b\min})}{10,24K_\gamma K_b d^2 T (D/d)^{0,2}}, \quad (11)$$

$$2\sigma_a^D = \frac{(D/T)^{0,8}(M_{c\max} - M_{c\min})}{5,4K_\gamma K_c d^2 T (D/d)^{0,2}}. \quad (12)$$



Здесь $P_{\max} - P_{\min}$ — размах продольного усилия в рассматриваемом элементе решетки; $M_{b\max} - M_{b\min}$ — размах изгибающего момента, действующего в плоскости узла в рассматриваемом элементе решетки; $M_{c\max} - M_{c\min}$ — размах изгибающего момента, действующего из плоскости узла в рассматриваемом элементе решетки.

Размахи эффективных напряжений $2\sigma_a^d$ в прилегающем к поясу элементе решетки рассматриваются как реактивные по отношению к размахам эффективных напряжений в поясе и их значения зависят

от действия продольной силы $P_{\max} - P_{\min}$

$$2\sigma_a^d = \frac{T}{t}(2\sigma_a^D)_P; \quad (13)$$

от действия изгибающего момента $M_{b\max} - M_{b\min}$

$$2\sigma_a^d = \frac{T}{t}(2\sigma_a^D)_{M_b}; \quad (14)$$

от действия изгибающего момента $M_{c\max} - M_{c\min}$

$$2\sigma_a^d = \frac{T}{t}(2\sigma_a^D)_{M_c}. \quad (15)$$

Если сочетание геометрических размеров элементов трубчатого узла таково, что в раскосе размах эффективных напряжений ниже размаха номинальных, то в качестве параметра нагруженности узла следует принимать значения последних. Характерно, что сопротивление усталости для таких узлов соответствует сопротивлению усталости тавровых соединений с угловыми швами.

Анализ испытаний на усталость сварных трубчатых узлов свидетельствует о том, что с позиций эффективных напряжений одной кривой усталости могут быть обобщены данные, охватывающие различные геометрические параметры узлов и конс-

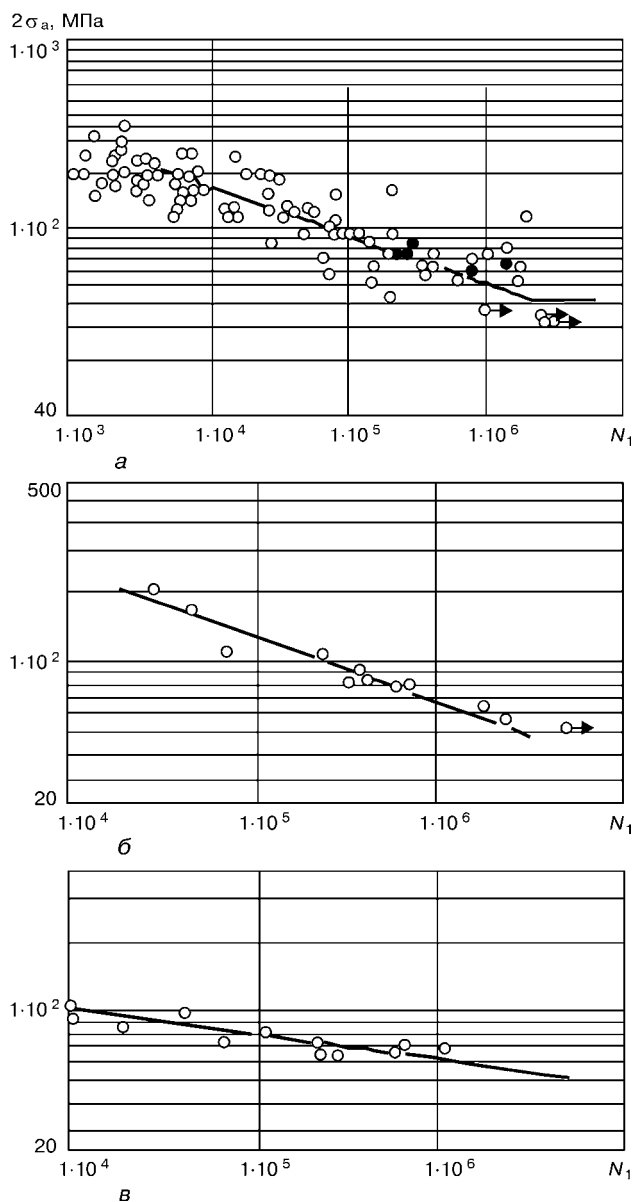


Рис. 3. Результаты испытаний трубчатых узлов и кривые усталости при разрушении по поясу для нагружений: а — продольной силой; б — изгибом в плоскости; в — изгибом из плоскости

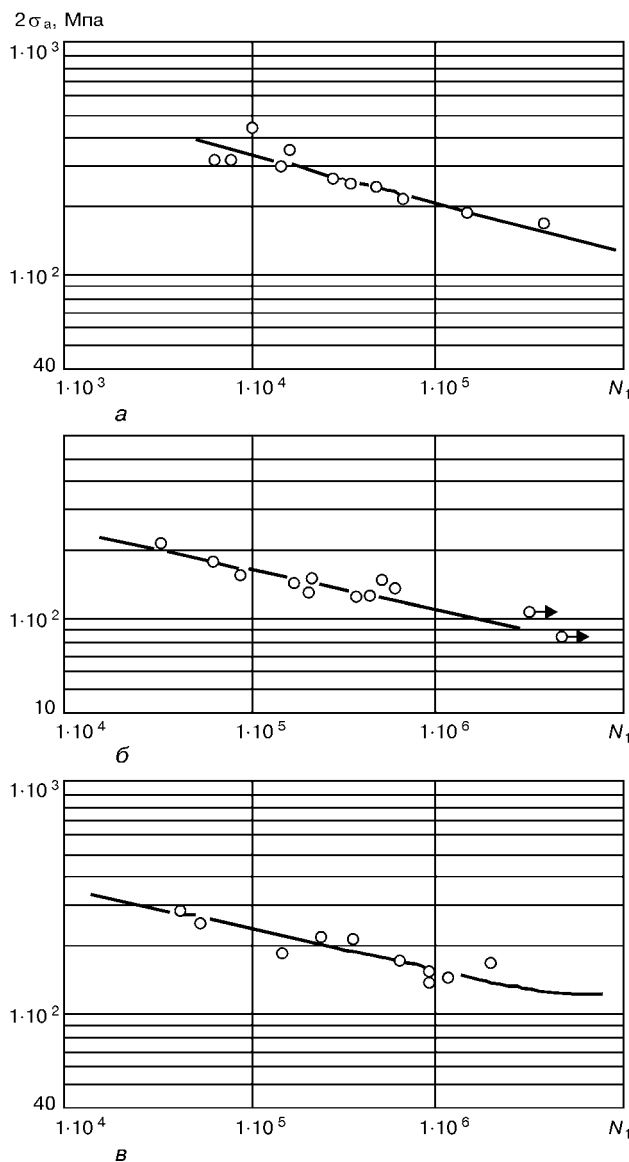


Рис. 4. Результаты испытаний трубчатых узлов и кривые усталости при разрушении по раскосу для нагружений: а — продольной силой; б — изгибом в плоскости; в — изгибом из плоскости

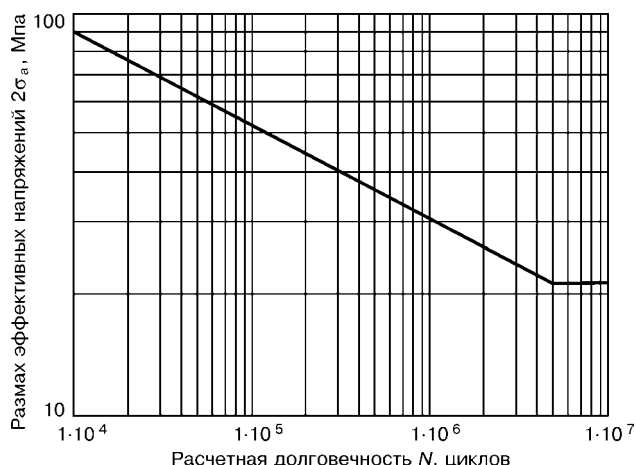


Рис. 5. Расчетная кривая усталости для оценки долговечности трубчатых узлов

структивные решения при условии идентичного характера циклического разрушения и заданного вида нагружения. Следовательно, для получения полной информации о сопротивлении усталости трубчатых узлов необходимы данные для построения кривых усталости от трех видов нагружения — продольной силой, изгибающим моментом в плоскости узла и изгибающим моментом, направленным из плоскости узла, и двух характерных разрушений по зоне сварного соединения — со стороны поясной трубы и со стороны трубы раскоса.

На рис. 3 и 4 приведены кривые усталости, построенные по результатам испытаний крупномасштабных трубчатых узлов, для сочетаний геометрических размеров элементов пояса и раскоса, обеспечивающих соответствующий характер разрушения. Видно, что сопротивление усталости трубчатых узлов при разрушении по элементу решетки заметно выше, чем при разрушении по элементу пояса. Наклон кривых усталости зависит также от вида нагружения.

Исходя из того, что в пространственных конструкциях в элементах решетки могут иметь место одновременно три вида усилий P , M_b и M_c , а узел на каждый вид нагрузки реагирует по-разному, необходимо решать задачу о закономерностях суммирования в узле напряжений, вызванных разными усилиями, и накоплении усталостного повреждения при сложном периодическом нагружении.

Учитывая характер напряженно-деформированного состояния в трубчатых узлах при нагружениях M_b и M_c , расчет на усталость следует выполнять на сумму напряжений от продольной силы и одного из моментов, вносящего большую долю в накопление усталостного повреждения. Вследствие отличия между кривыми усталости при различных нагружениях для определения суммы накопления усталостного повреждения используется прием приведения кривых усталости к одной базовой кривой усталости через соответствующие коэффициенты при параметре напряжений. За базовую принята наиболее обоснованная экспериментально кривая усталости для нагружения продольной силой, вызывающей зарождение усталостной трещины в поясе.

Таблица 2. Значения коэффициентов B и b для разных видов нагружения и характера циклического разрушения

Характер разрушения	Нагружение	Уравнение кривой усталости	B	b
По поясу	P	$N(2\sigma_a)^{D_{1,284}} = 2,631 \times 10^{13}$	1,00	1,00
	M_b	$N(2\sigma_a)^{D_{3,768}} = 9,044 \times 10^{12}$	1,283	0,880
	M_c	$N(2\sigma_a)^{D_{9,244}} = 2,853 \times 10^{22}$	$7,78 \times 10^{-3}$	2,158
По раскосу	P	$N(2\sigma_a)^{D_{4,712}} = 8,519 \times 10^{15}$	1,259	1,10
	M_b	$N(2\sigma_a)^{D_{5,775}} = 6,053 \times 10^{17}$	$9,59 \times 10^{-2}$	1,348
	M_c	$N(2\sigma_a)^{D_{6,025}} = 1,766 \times 10^{19}$	$4,36 \times 10^{-2}$	1,406

Чтобы для оценки долговечности узла в соответствии с кривой усталости, определяемой уравнением $\sigma_2^{m_2} N_2 = C_2$, воспользоваться кривой усталости согласно уравнению $\sigma_1^{m_1} N_1 = C_1$, необходимо вместо параметра σ_2 использовать параметр $B\sigma_2^b$, в котором

$$B = \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{1/m_1}, \quad b = m_1/m_2. \quad (16)$$

В табл. 2 приведены уравнения кривых усталости для разных видов нагружения и коэффициенты при размахах напряжений, позволяющие привести кривые усталости к базовой.

Расчетная кривая усталости (рис. 5) предполагает 98-мипроцентный уровень обеспеченности неразрушения и определяется уравнением:

$$\lg N + 4,284 \lg 2\sigma_a = 12,366. \quad (17)$$

Обобщенная кривая усталости позволяет по большей из сумм размахов напряжений в поясе или раскосе от действия продольной силы и момента установить расчетное сочетание нагрузок и характер разрушения, в соответствии с которым следует осуществлять расчет на усталость элементов узла.

Выводы

1. В решетчатых конструкциях из труб важными элементами являются узловые соединения, которые в значительной мере предопределяют экономические и прочностные показатели всей конструкции.

2. Методики оценки прочности узловых соединений при статическом и циклическом нагружениях конструкции позволяют выбрать оптимальные конструктивные решения узлов и сочетания геометрических параметров элементов, а также прочностные характеристики материала, обеспечивающие минимальные показатели массы и стоимости конструкции.

1. Гарф Э. Ф., Таурли З. М. Исследования и методы расчета статической прочности узловых сварных соединений решетчатых конструкций из цилиндрических труб. — М.: ВНИИОЭНТ, 1991. (Обзорн. информация. Сер. Техника и технология добычи нефти и обустройства нефтяных месторождений). — 68 с.
2. Marshall P. W. Connections for Welded Tubular Structures. IIW // Welding of Tubular Structures. — Pergamon Press. — 1984 — С. 1–117.
3. Maeda T., Uchino K., Sacurai H. Experimental Study on the Fatigue Strength of Welded Tubular T-X-Joints // IIW. Doc. XV-270-69.



4. *De Bark J., Wardenier J. and Kurobane Y.* The Fatigue Behavior of Hollow Section Joints // IIW. Welding of Tubular Structures-Pergamon Press. — 1984. — С. 419–430.
5. *Гарф Э. Ф., Литвиненко А. Е.* Оценка прочности сварных трубчатых узлов при периодическом нагружении элементов продольными силами // Автомат. сварка. — № 5. — 1985. — С. 11–17.
6. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. — Киев, Наук. думка, 1973. — 216 с.
7. *СНУП II-23-81.* Строительные нормы и правила: Нормы проектирования. — М. 1988. — 98 с.
8. *Gibstein M. B.* Stress Connections in Tubular Joints in Definitions. Determination and Application // Intern. Conf. Steel in Metal Structures. (Paris, Jct., 1981)
9. *Kurobane Y., Konomi M.* The Fatigue Strength of Tubular K-Joints // IIW /. Doc. XV-340-73.
10. *Garf E. F., Evdokimov V. V.* The Fatigue Design of Welded Tubular Connections // IIW. Doc. XV-637-87.
11. *Garf E. F.* Evaluation of the Fatigue Life of Welded Connections of Tubular Truss Structures / Ed. B.E.Paton. — Kiev: Electric Welding Inst. 1995. — Vol.4, Part 3. — 91 p.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
15.09.2003

УКРАИНСКОЕ ОБЩЕСТВО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НПФ «ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ» НПФ «УЛЬТРАКОН»

в период с **30 апреля** по **9 мая 2004 г.** в районе г. Анталия (Турция) проводят

Научно-практический семинар

«Современные аспекты организации неразрушающего контроля качества продукции на промышленном предприятии»

Для участия в семинаре приглашаются руководители предприятий, связанные с обеспечением качества и сертификацией выпускаемой продукции: технические директора, главные инженеры, зам.директора по качеству, главные механики, руководители подразделений неразрушающего контроля, начальники ЦЗЛ, ОТК, службы металлов и т.д., а также все лица, заинтересованные в усовершенствовании функционирования системы обеспечения качества, в частности, ее составной части — неразрушающего контроля.

Цель семинара — определение наиболее эффективных путей развития служб неразрушающего контроля качества на промышленном предприятии в современных условиях. Выработанные в процессе семинара схемы построения служб неразрушающего контроля качества, позволят по-новому взглянуть на систему качества и ее проблемы, разработать эффективную стратегию ее развития и оптимизировать затраты на функционирование и техническое перевооружение.

Тематика семинара

- ✓ *Общие вопросы неразрушающего контроля качества и сертификации продукции*
- ✓ *Нормативно-техническое обеспечение деятельности служб НК*
- ✓ *Приборное оснащение лабораторий НК*
- ✓ *Вопросы подготовки и аттестации специалистов, аккредитация подразделений НК*

Для принятия решения о включении доклада в программу семинара необходимо выслать тезисы доклада по адресу:

НПФ «Диагностические приборы» 04050, г. Киев, а/я 50 или E-mail: kozin@ndt-ua.com

**По вопросам, касающимся проведения семинара, обращаться к
Козину Александру Николаевичу, зам. директора НПФ «Диагностические приборы»:
тел./факс: (044) 247 67 18 или тел. (044) 495 11 45**



ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

В. С. ГИРЕНКО, М. Д. РАБКИНА, С. В. ГИРЕНКО

Рассмотрены физико-механические изменения служебных свойств конструкционных сталей после длительной работы в водородосодержащих средах в связи с развитием слоистых трещин. На основании результатов механических испытаний, методов механики разрушения, а также металлографического, масс-спектрального, рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов сделаны выводы об основных особенностях повреждений сосудов, эксплуатирующихся в нефтеперерабатывающей промышленности. Отмечаются некоторые противоречия между существующими и наблюдаемыми условиями обезуглероживания стали, а также подчеркивается существенная роль кристаллографической текстуры в развитии слоисто-водородного растрескивания. Оценены условия образования пузырей и развития расслоений.

The paper deals with physico-mechanical changes of service properties of structural steels after long-term operation in hydrogen-containing media, in connection with development of laminar cracks. Results of mechanical testing, fracture mechanics methods, as well as metallographic, mass-spectral, X-ray spectrum and X-ray analysis led to the conclusions of the main features of damage of vessels, operating in the petroleum industry. Some contradictions are noted between the existing and observed conditions of decarbonization of steel, and the significant role of the crystallographic texture in development of lamellar-hydrogen cracking. Conditions are evaluated of bubble formation and delamination development.

Многочисленные исследования свидетельствуют о возможности снижения пластических и прочностных свойств металлических материалов в результате воздействия водородосодержащих сред. Тем не менее, как и прямые экспериментальные исследования, выполненные по упрощенным и ускоренным методикам, так и разнообразные теоретические зависимости, требующие непосредственного определения ряда констант, не позволяют сделать конкретных выводов о снижении эксплуатационных характеристик материалов и скорости развития растрескивания в условиях практической диагностики конструкций после длительной эксплуатации. При этом возникают неопределенности в оценке расчетных сопротивлений и допускаемых коррозионных повреждений, а также разрешенного и остаточного ресурсов.

Ниже приводятся некоторые данные о физико-механических изменениях в конструкционных углеродистых и низколегированных сталях после длительной эксплуатации в водородосодержащих средах, включая деградацию стандартных механических характеристик, обусловленную общей необратимой хрупкостью материалов и оценку возможного снижения вязкости разрушения в результате направленной диффузии ионов водорода в зону высоких трехосных напряжений и пластических деформаций в вершинах развивающихся трещин в связи с искажениями кристаллической решетки.

Основное внимание уделяется слоистому растрескиванию корпусов оборудования, которое на практике встречается наиболее часто [1] и в значительной мере связано со структурной и кристаллографической текстурой стального проката. Роль последней возрастает в результате использования сталей, изготовленных с примене-

нием низкой температуры конца прокатки. При этом необходимо подчеркнуть, что влияние текстурных особенностей на водородное охрупчивание и трещиностойкость металла мало изучено.

Деструктивное воздействие водорода на сталь в результате сопутствующих переработке нефти коррозионных процессов обычно связывают с его двумя состояниями в металле: ионизированном (в виде протонов и отрицательно заряженных ионов) и молекулярном (в основном в виде H_2 и CH_4). С этим фактом непосредственно связан вопрос о его месте нахождения и, соответственно, о влиянии на физико-механические свойства металла в качестве диффузионного и остаточного. Считается, что водород находится в междоузлиях как атом ($d_H^0 = 0,024$ нм), а перемещается как протон H^+ , причем по тетраэдрическим порам ($r_4 = 0,291R$) ОЦК-решетки [2]. Диффузионную подвижность иона H^+ относят к его электронной структуре. В любом случае *диффузионно-подвижный* водород «разрыхляет» кристаллическую структуру металлической матрицы, тем самым ослабляя межатомные связи, что, в свою очередь, приводит к понижению механических свойств. Несмотря на то, что геометрический фактор позволяет рассчитывать на значительную растворимость водорода, в силу высокой подвижности протонов это не происходит, хотя влияние водорода на сталь уже начинает проявляться при его массовом содержании $(1...2) \cdot 10^{-4} \%$ [3]. Тем не менее, наличие *остаточного водорода* определяется не столько его растворимостью, которая ничтожно мала особенно при температурах ниже $500^\circ C$, сколько способностью находиться в молекулярном состоянии. При этом существенную роль играет процесс перехода из атомарной формы в молекулярную с учетом других примесей внедрения — углерода,



Таблица 1. Технологические характеристики исследуемых проб

Проба	Размеры $d \times t$, мм	Температура, °С	Давление, МПа	Ввод в эксплуатацию	Оrientировочная среда	Повреждения
1	3400×12,0	60	0,20	1993	Бензин, конденсат водяного пара	Слоисто-водородные трещины со стороны наружной поверхности
2	1150×25,0	50	3,75	1971	Водород около 85 %, углеводороды — остальное	Пузыри на внутренней поверхности

Примечание: d — диаметр сосуда; t — толщина его стенки.

Таблица 2. Химический состав металла проб в зоне А, массовая доля элементов, %

Таблица 2. Химический состав металлов пробы в зоне П, массовая доля элементов, %											
Проба		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
1	После длительной наработки	0,190	0,83	0,20	0,016	0,013	0,02	<0,01	0,03	0,036	0,002
	Нормируемые значения	0,14...0,22	0,40...0,65	0,15...0,30	<0,050	<0,040	в сумме <0,80			>0,02	—
2	После длительной наработки	0,207	1,02	0,47	0,025	0,021	0,04	0,04	0,05	—	0,097
	Нормируемые значения	0,17...0,22	0,85...1,10	0,45...0,51	0,014...0,022	0,016...0,022	0,03...0,09	0,04...0,09	0,06...0,17	—	0,10...0,17

кислорода и азота. Молекулы формируются на межфазных границах, границах зерен, в порах и в других несплошностях и, накапливаясь, оказывают давление на стенки полости.

Отмеченные процессы определяют общее и/или локальное изменение служебных свойств и характеристик трещиностойкости конструкционных сталей.

Пробы металла 1, 2 (табл. 1) отбирались из корпусов оборудования после проведения их обследования, в результате которого возникала необходимость удаления участков, имеющих недопустимые эксплуатационные дефекты, с последующим восстановительным ремонтом.

Образцы для испытаний на растяжение и ударный изгиб отбирались с учетом УЗ контроля и металлографических исследований на удалении от зоны слоисто-водородного растрескивания для обеспечения сплошности металла (зона А). Из этой же зоны отбирались фрагменты для определения усредненного по толщине стенки конструкции химического состава металла, структурно-текстурных особенностей стального проката, а также содержания остаточного водорода.

Кроме того, в зонах, непосредственно прилегающих к слоистым трещинам (рис. 1, зона Б), выполнялись локальные исследования, включающие масс-спектральный, рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы. Также была предпринята попытка оценить роль локального водородного охрупчивания металла в вершинах слоистых трещин с позиций механики разрушения.

Общий химический состав рассматриваемых проб после длительной эксплуатации сосудов в водородосодержащих средах представлен в табл. 2.

Видно, что он за время эксплуатации в целом не изменился. Обращает на себя внимание несколько завышенное содержание марганца в пробе 1.



Рис. 1. Слоисто-водородное растрескивание в зоне Б (×100)



Что касается структурной текстуры, то в обеих пробах по всей толщине стенки четко прослеживается ферритно-перлитная полосчатость, характеризующая горячекатаный металл. Наряду с этим имеют место неметаллические включения, в основном, деформированные сульфиды, расположенные в ферритной составляющей (рис. 2). В пробе 2 обнаружены также точечные нитриды, по всей видимости это соединения титана, поскольку его содержание составляет около 0,1 % (табл. 2).

Следует отметить, что некоторые структурные отличия наблюдаются по толщине стенки сосудов. Так, срединным слоям пробы 2 соответствует более грубозернистая структура и здесь же сосредоточено большее количество перлита, а в пробе 1 доля неметаллических включений приходится в основном на приповерхностные сечения, причем, со стороны наружной поверхности, где их объемная доля составляет 0,5 % (табл. 3). С этими данными хорошо согласуются результаты распределения водорода (табл. 3). Как отмечалось, остаточный водород, находящийся преимущественно в виде соединений H_2 и CH_4 , располагается на поверхностях раздела и несовершенствах структуры, являющихся ловушками для газообразных молекул. Как известно, поверхностями раздела обычно служат межфазные границы между матрицей и неметаллическими включениями.

Кроме структурной текстуры целесообразно обратить внимание на проявление кристаллографической текстуры. Ранее было показано, что кристаллографическая текстура по сечению листов неоднородна [4, 5]. Так, в приповерхностных слоях пробы 1 сформировалась текстура типа $\{110\}<100>$, необычная для ОЦК металлов [6]. Более подробный анализ текстурной обстановки будет представлен ниже при исследовании зоны Б.

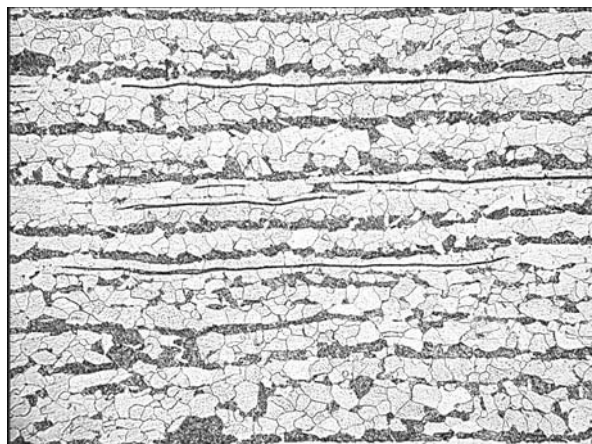


Рис. 2. Типичная структурная текстура горячекатаного металла (X500)

Механические характеристики рассматриваемых проб представлен в табл. 4.

При этом можно заключить, что общие физико-механические изменения в металле даже вблизи зон развитого слоистого растрескивания с практической точки зрения не носят катастрофического характера и, соответственно, незначительно влияют на работоспособность конструкции. Наиболее существенным является снижение значений σ_T (проба 1), требующее с формальной точки зрения некоторой корректировки допускаемых напряжений по пределу текучести.

Уменьшение ударной вязкости в этом случае не является определяющим для повышенных эксплуатационных температур, но может иметь некоторое значение при назначении температуры гидротестирования.

В отличие от общей необратимой хрупкости локальные изменения вязкости разрушения, вызванные диффузией водорода в зону упруго-пластического искажения кристаллической решетки в вершинах развивающихся слоистых трещин (см. рис. 1), требуют для своей оценки несколько иного подхода.

Слоистое растрескивание корпусов аппаратов реализуется в следующих видах:

развивающихся расслоений в одной или нескольких плоскостях, соединяемых ступенчатыми трещинами (см. рис. 1);

Таблица 3. Послойное распределение неметаллических включений и водорода в зоне А

Проба	Слой	Массовое содержание водорода, $\times 10^{-4}$, %	Неметаллические включения		
			Деформированные сульфиды (балл)	Недеформированные точечные нитриды (балл)	Объемная доля, %
1	внутренний	1,5...2,3	1 (б)	—	0,27
	наружный	3,0...4,3	2...4 (б)	—	0,52
2	наружный	1,1...1,4	2...3 (б)	<1 (а)	—
	средний	1,0...1,6	4...5 (б)	1 (а)	—
	внутренний	2,2...3,6	2 (а)	<1 (а)	—

Таблица 4. Механические свойства металла проб зоны А

Проба		σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ² , °С	
						-20	+20
1	После длительной наработки	292,4...307,3	509,9	22,7...27,3	55,8...56,4	65,3	56,2...65,6
	В состоянии поставки	300,0...315,0	420,0...455,0	32,0...34,0	—	80,0	—
2	После длительной наработки	314,9...321,2	571,5...572,5	36,7...30,4	59,6...64,0	—	99,0...109,0
	В состоянии поставки	391,0...425,0	554,0...593,0	26,3...29,0	55,3	—	117,0...156,0

Примечание. Данные получены инж. А. В. Бернацким (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ).



развивающихся пузырей, когда рост внутреннего давления водорода и/или метана в полости приводит не только к распространению дефекта, но и к пластическому деформированию перемишки между расслоением и поверхностью оболочки;

не развивающихся пузырей, когда рост внутреннего давления приводит только к пластическому деформированию, вызывающему увеличение прогиба стенки пузыря («выпучиванию»).

Минимальное давление в слоистой трещине, при котором возможно образование пузыря, может быть оценено в рамках теории деформирования жестко-пластического тела применительно к круглой пластине, нагруженной равномерным давлением q [7]. Деформационное упрочнение материала при этом не принимается во внимание, но на заключительных стадиях развития пузырей его можно приближенно учесть с помощью соответствующего увеличения напряжений пластического течения.

Величина относительного давления q/σ_T , при котором может образоваться пузырь, определяется следующей зависимостью:

$$\frac{q}{\sigma_T} = \alpha \frac{h^2}{4r^2}, \quad (1)$$

где σ_T — предел текучести материала (рис. 3); α — коэффициент, зависящий от условий закрепления контура пластины.

При шарнирном закреплении $\alpha = 6$, при жестком — $\alpha = 11,3$. Наблюдения за формой несплошностей показывают, что в вершине дефекта происходит поворот сечения, обусловленный пластическим шарниром. Сопротивление материала, возникающее в процессе поворота, должно несколько увеличивать коэффициент α . Тем не менее, для оценки минимального давления, вызывающего выпучивание, целесообразно принять $\alpha = 6$.

Таким образом, зависимость (1) определяет минимальное внутреннее давление молекулярного водорода или метана, необходимое для реализации процесса образования пузырей. Если образование пузыря происходит со стороны внутренней поверхности, значение q необходимо уменьшить на величину рабочего давления сосуда.

В тоже время, для развития трещины необходимо относительное давление [8]:

$$\frac{q}{\sigma_T} = \frac{K_{IC}}{\sigma_T \sqrt{12h} \beta}, \quad (2)$$

где $\beta = (0,1267 + 0,6733\lambda^{-1} + 0,5\lambda^{-2} + C)$; $C = (0,0104 - 0,1267\lambda^{-1} - 0,3367\lambda^{-2} - 0,1667\lambda^{-3}) \times (0,6733 + \lambda^{-1})^{-1}$; $\lambda = h/r \leq 2$.

Соотношения (1) и (2) продемонстрировано на рис. 3. Они наглядно показывают, что в зависимости от относительных размеров трещин h/r ; вязкости разрушения металла K_{IC} и толщины прослойки h слоистые трещины могут или развиваться или без развития приобретать форму пузырей.

С одной стороны, при низких значениях вязкости разрушения металла $K_{IC} < 30 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, образование пузырей, в основном, не должно происходить (рис. 3, а). С другой, при вязкости разрушения $K_{IC} < 60 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ образование пузырей возможно при определенных размерах дефектных зон (рис. 3, б). Это позволяет приближенно оценить степень локального охрупчивания металла, вызванного диффузией водорода в зону предразрушения.

В связи с этим целесообразно рассмотреть данные о слоистом растрескивании корпуса емкости (проба 1), полученные в результате визуального и УЗ контроля, а также последующего разрушающего контроля. Эти результаты показывают, что радиус r большинства пузырей не превышает 15 мм, а расстояние до наружной поверхности

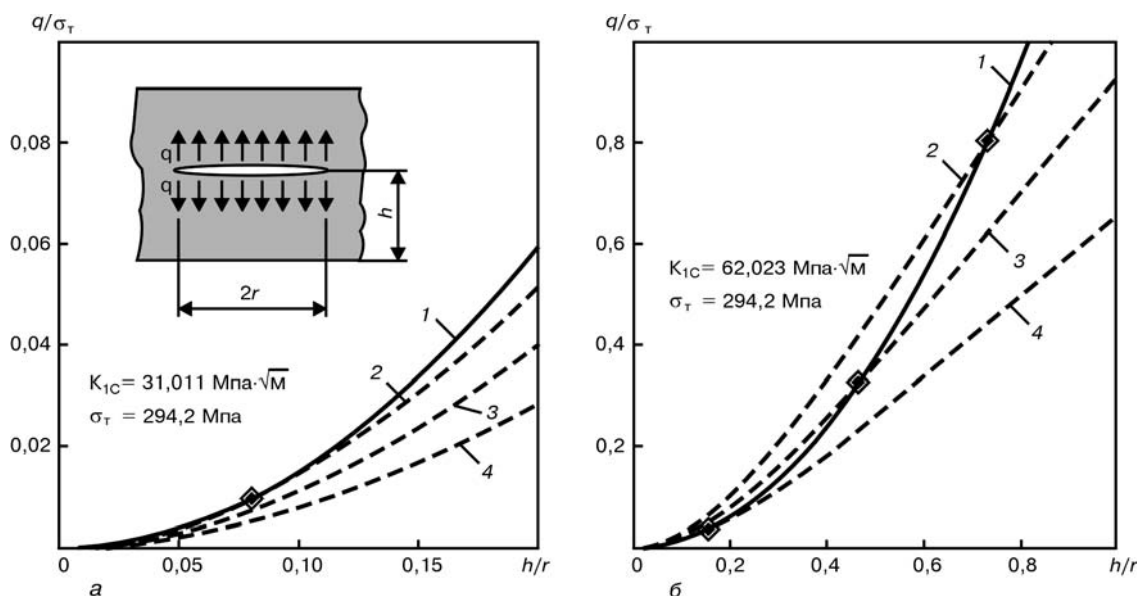


Рис. 3. Относительное давление q/σ_T , необходимое для образования пузырей или распространения слоистых трещин в зависимости от относительных размеров дефектных зон h/r : 1 — условие образования пузыря; 2–4 — условие роста при $h = 3,0; 5,0$ и $10,0$ мм соответственно (ромбами обозначены границы, отделяющие условия образования пузыря от условий роста слоистых трещин)



Таблица 5. Микротвердость структурных составляющих в пробе 1

Структура	Феррит HV 0,025	Перлит HV 0,01
Обычная ферритно-перлитная полосчатость	100...105	185
Обезуглероженная зона	130...162	185...205

стенки сосуда h составляет 4...4,5 мм. Зависимости (1) и (2) позволяют оценить минимальное давление q на начальных стадиях образования пузырей, которое в данном случае имеет значение порядка 40 МПа, а также соответствующее значение $K_{1C}^Z \geq 50 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, при котором может происходить развитие либо торможение образования пузырей.

Представляется целесообразным сопоставить приведенные данные со значениями K_{1C}^Z в условиях вязкого состояния металла, характерными для горячекатаного листа из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в отсутствии водородного охрупчивания: для стали ВСтЗсп значение вязкости разрушения будет 30,4...37,2; для 09Г2С — 62,0...106,1; для 14Г2АФ — 40,0...56,8; для 10ХСНД — 38,8...46,5. Раннее эти данные были получены в связи с тем, что анизотропия вязкости разрушения, обусловленная структурной и кристаллографической текстурой проката, относится к одной из основных причин снижения эксплуатационной надежности сварных конструкций [9].

Сопоставление полученных результатов указывает на незначительные изменения трещиностойкости металла в условиях непосредственного воздействия водородосодержащей среды. Соответственно, при решении практических задач по оценке трещиностойкости элементов конструкций в подобных случаях, по-видимому, могут быть использованы минимальные значения вязкости разрушения, характерные для горячекатаного металла при развитии трещин параллельно плоскости листа ($K_{1C}^Z \approx 30 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$).

Этот вывод, вытекающий из общих оценок механики сплошной среды, целесообразно дополнить результатами локальных физико-химических исследований.

Прежде всего, обращает на себя внимание следующее обстоятельство. Как на начальных стадиях развития слоистых трещин, так и в зоне предразрушения — перед фронтом магистральной трещины — возникает ситуация, подобная приведенной на рис. 1. Отчетливо видно, что зона предразрушения представляет собой систему как отдельных, так и взаимодействующих микротрещин и пор, которые располагаются в обезуглероженных зонах, наследующих текстуру проката. При этом слоистые трещины располагаются на некотором расстоянии (4...4,5 мм) от внешней поверхности сосуда, что может быть связано с неравномерным распределением неметаллических включений по толщине стенки сосуда (см. табл. 3) и с особенностями кристаллографической текстуры.

Послойные исследования структурных особенностей участков, непосредственно прилегающих к слоистым трещинам (зона Б), дали следующие результаты.

Эти участки характеризуются резко выраженной ферритной составляющей (см. рис 1), что свидетельствует о пониженном содержании углерода в них, т. е. их можно считать обезуглероженными. Как показал микрорентгеноспектральный анализ, содержание углерода местами падает до 0, тогда как в перлитной фазе оно может достигать 0,8 % при среднем содержании ~ 0,2 % (см. табл. 2). Кроме того, методом масс-спектрального анализа было показано, что обезуглероженным зонам соответствует повышенное массовое содержание водорода, достигающее значений ~ $6 \cdot 10^{-4} \%$, особенно вблизи трещины. Это же подтверждается данными измерения микротвердости (табл. 5).

Насыщение водородом приводит к тому, что твердость этих зон в 1,5 раза выше, чем твердость феррита в обычном состоянии. Как отмечается в работе [10], интенсивное изменение микротвердости ферритных зерен при наводороживании, а также преимущественное разрушение наводороженных образцов ферритно-перлитной стали при растяжении по ферритной составляющей указывает на преимущественное воздействие водорода именно на ферритную фазу.

Полученные результаты вступают в противоречие с некоторыми представлениями о влиянии водородосодержащих сред на физико-механические свойства металлов.

Во-первых, большинство авторов считает возможным протекание реакции обезуглероживания: $2\text{H}_2 + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{Fe}$ в случае нормального давления при температурах не ниже 300 °С. В рассматриваемом случае ярко выраженное обезуглероживание наблюдается при значительно более низких температурах и невысоких давлениях в течение небольшого периода эксплуатации (см. табл. 1).

Во-вторых, многие модели построены на предположении о том, что диффузия водорода преимущественно осуществляется в зону предразрушения, которая отстоит от вершины трещины на расстоянии 2δ (δ — раскрытие вершины трещины). Теоретически в этой зоне возникают максимальные (нормальные) напряжения. Полученные результаты показывают, что зона предразрушения носит значительно более протяженный и сложный характер. Она представляет собой отдельные микротрещины и микропоры, взаимодействующие в результате давления CH_4 и H_2 .

Касаясь локализации трещин на некотором расстоянии от поверхности, необходимо отметить следующее. Как было показано (см. табл. 3), неметаллические включения по толщине стенки сосудов располагаются неравномерно. Так, в пробе 1 деформированные сульфиды преимущественно сосредоточены в приповерхностных слоях на расстоянии 4...4,5 мм от наружной поверхности. Это создает повышенную концентрацию «ловушек» водорода и, соответственно, обуславливает зарождение слоистых трещин.

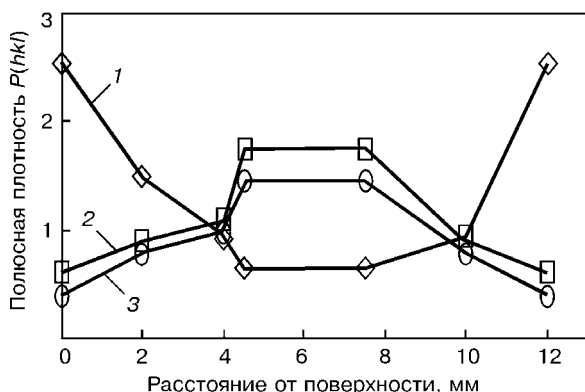


Рис. 4. Распределение полюсной плотности $P(hkl)$ по толщине стенки пробы 1: 1–3 — соответственно для $P(110)$; $P(100)$; $P(111)$ [6].

Вместе с тем, распространение этих трещин может быть дополнительно облегчено наличием благоприятной кристаллографической текстуры. Как отмечается в работе [6], именно в этих слоях, соответствующих плоскости трещины расслоя и находящихся на расстоянии 4,5 мм от поверхности стенки сосуда, сформировалась типичная текстура прокатки ОЦК-металлов и сплавов, которая может быть описана как $\{001\}\langle 110 \rangle$ и $\{111\}\langle 110 - 112 \rangle$ (рис. 4). В этом случае с поверхностью образцов совпадают, в основном, кристаллографические плоскости $\{001\}$ и $\{111\}$, а с направлением прокатки — кристаллографические направления $\langle 110 - 112 \rangle$, лежащие в указанных выше плоскостях. Следует иметь в виду, что в металлах с ОЦК-решеткой плоскости семейства $\{001\}$ являются одновременно плоскостями скола, что значительно облегчает процесс разрушения.

Выводы

Зафиксировано обезуглероживание конструкционной низкоуглеродистой стали, протекающее — в отличие от существующих представлений — при невысоких температурах ($\sim 60^\circ\text{C}$) и давлениях паров бензина и воды (менее 0,2 МПа) и následующее текстуру материала.

Слоистое растрескивание, возникающее в обезуглероженных зонах в результате давления метана и молизированного водорода, как на начальных стадиях своего развития, так и в зоне предразрушения перед фронтом магистральной трещины, носит сложный характер. Оно представляет собой взаимодействие отдельных микротрещин и пор, вызывающее локальную концентрацию пластических деформаций с сопутствующим увеличением содержания водорода. При этом зоны предразрушения имеют более протяженный характер, чем это предусматривается некоторыми модельными представлениями, что, в частности, может быть связано с искажениями формы пластических зон

в результате нарушения плоского деформированного состояния.

Подтверждена негативная роль неметаллических включений и других структурных «ловушек» молизированного водорода и метана в процессе инициирования слоистого растрескивания. Вместе с тем подчеркивается, что мало исследованное влияние кристаллографической текстуры прокатки имеет существенное значение для условий последующего развития зародышевых трещин. Соответственно, из этого вытекает целесообразность использования сталей с изотропными структурными и кристаллографическими характеристиками.

С позиций механики разрушения оценены условия образования пузырей и распространения слоистых трещин. Сделан вывод о несущественных локальных изменениях вязкости разрушения металла в результате диффузии водорода в зону упруго-пластического искажения кристаллической решетки перед фронтом развивающихся слоистых трещин.

Показано, что эксплуатационное охрупчивание низкоуглеродистых и низколегированных сталей носит второстепенный характер. Соответственно, разрешенный или остаточный ресурс определяется, в первую очередь, степенью поражения корпуса сосуда слоистыми трещинами.

1. Некоторые результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов нефтехимической промышленности / В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин, А. В. Бернацкий, Е. А. Давыдов, В. В. Кузьмин // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.
2. Фаст Дж. Взаимодействие металлов с газами. Т. 2. Кинетика и механизм реакций. — М.: Металлургия, 1975. — 351 с.
3. Вайман А. Б., Мелехов Р. К., Смилян О. Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. — Киев: Наук. думка, 1990. — 268 с.
4. Особенности текстуры и анизотропии механических свойств конструкционных сталей / Ю. А. Перлович, В. П. Павелко, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. М. Козачек, И. Я. Дзыкорвич // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1990. — № 1. — С. 50–58.
5. Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию характеристик разрушения низколегированной стали контролируемой прокатки / В. В. Усов, В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, А. В. Бернацкий, Н. М. Шатуляк // Фіз.-хім. механіка металів. — 1993. — № 2. — С. 47–52.
6. Рабкина М. Д., Усов В. В., Шатуляк Н. М. Водородно-слоистое растрескивание конструкционных сталей // Матер. Междунар. конф. «Современные проблемы сварки и ресурса конструкций» 24–27 ноября 2003, Киев, Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ.
7. Прочность. Устойчивость. Колебания / Справ. Т. 1. М.: Машиностроение — 1968. — С. 616.
8. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. пособие. Т. 2 — Киев: Наук. думка. — 1988. — 457 с.
9. Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
10. Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И. Влияние водорода на свойства стали — М.: ГНТИЛЦМ, 1962. — 197 с.



КОНТРОЛЬ ЛИНИИ СИНТЕЗА АММИАКА СИСТЕМОЙ АЭ ДИАГНОСТИКИ ЕМА-3У

С. А. НЕДОСЕКА

Примером успешного применения диагностической системы ЕМА-3У может служить контроль линии синтеза аммиака, проведенный на одном из химических предприятий Украины. Здесь впервые были продемонстрированы некоторые преимущества данной системы, в частности, работа в полностью автоматическом режиме непрерывного мониторинга, не требующем вмешательства оператора, и дистанционный контроль за работой системы. Результаты испытания показали перспективность внедрения мониторинговых систем АЭ диагностики на ответственных объектах химических производств.

An example of successful application of diagnostic ЕМА-3U system can be control of the line of ammonia synthesis, conducted in one of the chemical enterprises of Ukraine. Some of the advantages of this system were demonstrated here for the first time, namely operation in the fully automated mode of continuous monitoring, not requiring the operator intervention, and remote control of the system operation. Testing results showed the good prospects for introduction of monitoring systems of AE diagnostics in critical objects of chemical productions.

Контроль ответственных объектов промышленности, таких, как заводские технологические линии, в пусконаладочный период представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Указанный период характеризуется неопределенностью реальных сроков проведения этапов работ, требуемых для ввода объектов в штатный режим эксплуатации, возможностью возникновения внештатных ситуаций в процессе выхода на рабочий режим, а также отсутствием достаточной информации о текущих параметрах состояния отдельных узлов и агрегатов.

Данная ситуация в полной мере относится и к контролю линий синтеза аммиака, состоящих из десятков агрегатов, включающих колонны синтеза, турбины, резервуары и трубопроводные системы. Использование систем АЭ диагностики для оценки состояния таких технологических линий решает ряд важных вопросов, которые трудно решить с использованием других неразрушающих методов контроля.

В первую очередь, это 100%-ный контроль основного металла и сварных швов. Метод АЭ обеспечивает, в частности, прием информации из тех недоступных мест, к которым невозможен подход с дефектоскопами, которые скрыты под слоем изоляции, которые работают при высоких и низких температурах. Далее, контроль всех объектов осуществляется одновременно и непрерывно, и позволяет силами одного оператора осуществлять изучение и анализ ситуации в целом. Современные системы АЭ диагностики позволяют регистрировать и накапливать в памяти компьютера огромные объемы данных в процессе испытаний, а затем по окончании испытаний, проводить их многократный виртуальный повтор, что обеспечивает возможность всестороннего глубокого анализа полученных результатов. Но наиболее важной особенностью АЭ диагностики является возможность обнаружения опасной ситуации непосредственно в процессе испытания, часто на той стадии, когда локальное разрушение объекта, течь или другой

дефект только начинает формироваться. Это делает АЭ диагностику незаменимым инструментом предотвращения аварий.

Примером успешного применения диагностической системы ЕМА-3У может служить проведенный контроль линии синтеза аммиака на одном из химических предприятий Украины. Здесь впервые были продемонстрированы некоторые преимущества данной системы, дополняющие приведенные выше. Такими преимуществами является работа в полностью автоматическом режиме непрерывного мониторинга, не требующем вмешательства оператора, и дистанционный контроль за работой системы, осуществляемый посредством локальной сети или Интернет. Важность автономной работы весьма велика. В течение пуско-наладочного периода могут возникать ситуации, опасные для персонала, в частности, выбросы аммиака. Система ЕМА-3У может продолжать работу, в то время как операторы находятся в безопасном месте. Автономный источник питания в сочетании с программой слежения, самотестирования и самовосстановления обеспечивают системе ЕМА-3У беспрецедентный уровень надежности.

При выполнении процедуры контроля линии синтеза аммиака передвижную диагностическую лабораторию, смонтированную в микроавтобусе (см. цв. вклейку, рис. 1), необходимо размещать возле диагностируемых узлов и агрегатов. Наряду с 16-канальной системой ЕМА-3У для контроля линии синтеза использовали также две восьмиканальные системы ЕМА-2, не имеющие средств для автономной работы. Во время одного из этапов поднятия рабочего давления по правилам техники безопасности необходимо было удаление персонала из зоны, прилегающей к агрегатам линии синтеза. В связи с этим работа двух систем ЕМА-2 была временно остановлена, в то время как система ЕМА-3У продолжала работу в автоматическом режиме, оценивая опасность состояния объектов кон-



Таблица 1. Контролируемые изделия, номера каналов АЭ и тип локационных антенн

Номера каналов	Тип объекта контроля	Условное обозначение объекта	База, м	Длина, м	Тип локации
5	Трубопровод	A	—	—	Зонный
6	Трубопровод	B	—	—	Зонный
7–8	Сосуд давления	C	10	11	Линейный (7 — на выходе; 8 — на корпусе)
9	Сосуд давления	D	—	≈1,2	Зонный
10–11	Сосуд давления	E	6,7	7,5	Линейный (верх — фланец; низ — днище)
12–13	Сосуд давления	F	5,2	9	Линейный (на корпусе)
14–15	Сосуд давления	G	3,6	10	Линейный (на корпусе)

Таблица 2. Регулировка порогов (Дб) по датчикам АЭ в процессе нагружения линии синтеза аммиака

Время начала испытания		Состояние объекта	Номера каналов АЭ										
			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
18.07.03	15:30:00	Подъем давления до 3 МПа	21	22	18	15	15	18	16	18	14	15	15
18.07.03	18:01:33	Выдержка при 3 МПа	24	32	24	22	15	28	24	30	22	22	22
19.07.03	02:32:05	Подъем давления до 13 МПа	32	32	22	24	32	28	24	30	22	22	22
19.07.03	14:33:09	Выдержка при 13 МПа	40	40	20	20	40	20	20	20	20	20	20
19.07.03	21:35:03	Подъем давления до 15 МПа	40	40	20	20	40	22	22	22	22	22	22
19.07.03	23:35:08	Выдержка при 15 МПа	40	40	24	24	40	24	24	24	24	24	24
20.07.03	00:15:18	Подъем давления до 23 МПа	40	40	24	24	40	24	24	24	24	24	24
20.07.03	10:07:44	Выдержка при 23 МПа	40	40	24	24	40	24	24	24	24	24	24
21.07.03	07:25:00	Момент фиксации утечки аммиака (объект G), давление 25,9 МПа	40	40	24	24	40	24	24	24	24	24	24

троля и записывая необходимые данные на жесткий диск компьютера.

Датчики АЭ крепятся на объектах контроля перед началом испытаний. Для закрепления (см. цв. вклейку, рис. 2) датчиков на металлической поверхности использовали акустико-прозрачный, связующий состав и внешнюю фиксацию клеящей лентой.

Испытание линии синтеза аммиака химического завода системой АЭ диагностики ЕМА-ЗУ проведено в режиме периодически непрерывного мониторинга в течение 4 сут. Время начала испытания 18.07.03 15:30:00. Время завершения испытания 21.07.03 08:02:00. Нагружение линии синтеза до штатного давления проводили в несколько этапов, с периодическим подъемом и сбросом рабочего давления, в связи с чем происходили и колебания температуры рабочего агента. В процессе испытания проводили ряд пуско-наладочных и ремонтных работ, на протяжении которых запись информации системой ЕМА-ЗУ не велась.

Обобщенный график изменения рабочего давления и температуры (некоторые упрощения вида графика сделаны на участках колебания рабочих параметров при выполнении технологических операций) приведен на рис. 3 (см. цв. вклейку).

Системой ЕМА-ЗУ контролировали семь объектов (табл. 1).

Измерение акустической активности и координат расположения потенциально опасных источников АЭ проводили как в периоды подъема рабочего давления, так и в моменты кратковременных и длительных выдержек. Измерение акустической эмиссии при выдержках является наиболее пока-

зательным, поскольку при выдержках отсутствуют шумы, возникающие вследствие работы системы нагружения и движения рабочего вещества. Если в период выдержки не обнаружены сигналы АЭ, существенно превышающие допустимое значение выбранного аналитического показателя*, то это является свидетельством нормального состояния контролируемого объекта.

Определенные методические сложности представляет правильный выбор режимов работы аппаратуры в различные периоды испытаний и настройка параметров таким образом, чтобы фиксировались сигналы АЭ, несущие информацию о развивающихся дефектах. Для этого перед началом нагружения контролируемых объектов следует устанавливать пороги дискриминации сигналов АЭ таким образом, чтобы при отсутствии нагрузки сигналы дискретной АЭ отсутствовали, а уровень порогов превышал средний уровень шума. В процессе испытаний уровень порогов корректировали (табл. 2), исходя из этих же соображений, но дополнительно учитывают шумы и дискретные сигналы АЭ, вызванные процессом нагружения. К особенностям таких сигналов следует отнести отсутствие четкой локализации источника и низкий уровень амплитуды.

Подъем рабочего давления характеризуется более высокой АЭ активностью, чем в периоды выдержки, поэтому величину порогов корректируют в сторону увеличения. В то же время особенности технологического цикла запуска линии

*Устанавливается перед контролем на основании испытания специальных образцов.



синтеза аммиака таковы, что отдельные агрегаты нагружаются в различное время. Аналогично, в момент выдержки давления на основном участке (колонна синтеза) может наблюдаться подъем рабочего давления в некоторых агрегатах и трубопроводных системах.

Процесс записи акустической эмиссии происходил в автоматическом режиме, используемом для непрерывного мониторинга конструкций. За процессом мониторинга велся непрерывный контроль группой специалистов. Запись результатов испытания на жесткий диск системы ЕМА-3У происходила через каждые 20 мин. Таким образом, с учетом остановок записи при проведении технологических операций и при настройке аппаратуры, общее время записи составляет 1960 мин, т. е. приблизительно 33 ч.

Результаты испытаний сохранены в 98 файлах общей емкостью 482 Мб. В процессе испытаний не было выявлено опасных дефектов основного металла контролируемых объектов. Отмечено периодическое повышение АЭ активности на отдельных агрегатах в момент повышения рабочего давления.

Во время заключительного периода испытаний (рабочее давление превышало 23 МПа) произошло частичное разрушение корпуса патрубка для размещения термопары, с последующей утечкой аммиака (объект *G*). Система ЕМА-3У показала высокий уровень АЭ активности. Однако, для состояния основного металла указанная ситуация не представляла опасности, о чем свидетельствовала аналитическая составляющая сигналов АЭ и их равномерное распределение по длине локационной антенны.

Результаты испытаний. Все испытания проведены при одинаковых установках режима усиления (логарифмический режим) и с одинаковым типом порога дискриминации, а именно фиксированным. Такая схема настройки аппаратуры позволяет четко ограничить уровень пропускаемых сигналов и в то же время увеличить информативность за счет регистрации сигналов с относительно низкой амплитудой. Поэтому при испытаниях четко фиксируются моменты начала активности АЭ на каждом из контролируемых объектов, а характер акустической эмиссии позволяет судить о степени опасности их состояния.

Начальный момент испытаний характеризуется низкой активностью АЭ и низким уровнем непрерывной АЭ. При относительно низких порогах зафиксирована акустическая эмиссия невысокого уровня и в незначительных количествах.

В частности, для объекта *F* при испытании на этой стадии показано появление 17 сигналов АЭ на протяжении 20 мин испытания, из которых в зону контроля попали только 2 (см. цв. вклейку, рис. 4). Уровень непрерывной АЭ также весьма незначителен.

Первая из осуществленных выдержек характеризуется отсутствием акустической активности, уровень шумов по отдельным участкам контроля повышен, что связано с движением рабочего вещества. На рис. 5 (см. цв. вклейку) четко виден участок отсутствия АЭ сигналов на этапе выдержки

(правый нижний график), перед этим число сигналов АЭ также незначительно. Анализ параметров сигналов АЭ, проведенный непосредственно при данном испытании, показал их случайный характер, не связанный с процессом разрушения.

Дальнейшее нагружение линии синтеза аммиака характеризуется периодически высокой активностью АЭ. Наиболее важными показателями опасности состояния контролируемого объекта в этом случае являются появление сигналов с высоким аналитическим показателем и локализация сигналов в одной области, что говорит о наличии формирования зоны разрушения. Ни один из этих показателей при дальнейшем поднятии рабочего давления не был зафиксирован ни на одном из контролируемых участков.

Как правило, во временные периоды с высокой активностью АЭ характер распределения сигналов по длине контролируемого участка равномерный, распределение амплитуд равномерное. Таким образом, данный временной участок подъема рабочего давления свидетельствует о нормальном состоянии всех нагружаемых объектов.

На рис. 6, 7 (см. цв. вклейку) представлены результаты испытания, проведенного 19.07.03 (начало в 05:07:08). Для двух объектов контроля (*C* и *F* соответственно) отмечена высокая активность АЭ. Как видно из рисунков, сигналы акустической эмиссии излучаются равномерно по всей протяженности зоны контроля. Амплитуда пришедших сигналов имеет такой же уровень, как и амплитуды сигналов на стадии первоначального нагружения и первой выдержки.

Следовательно, опасные дефекты в основном материале контролируемых объектов отсутствуют. Указанное обстоятельство позволило продолжить дальнейший подъем рабочего давления в агрегатах линии синтеза аммиака.

Последующий подъем давления и проведенные выдержки показали, что состояние контролируемых объектов является нормальным. Особенно показательны результаты, полученные при выдержке давления на уровне 23 МПа (см. цв. вклейку, рис. 8). Все контролируемые объекты в момент выдержки характеризуются полным отсутствием или крайне незначительным количеством сигналов АЭ. Наиболее «шумным» является участок трубопровода, расположенный под датчиком 5. Однако, уровень амплитуды сигналов относительно невысокий, а количество сигналов невелико.

Последующий подъем рабочего давления до уровня 25,9 МПа показал отсутствие опасных дефектов в материале объектов контроля. Предварительный анализ полученных результатов показал, что все они пригодны к дальнейшей эксплуатации при данном давлении.

Особое внимание следует уделить объекту *G*. На протяжении всего процесса испытаний, вплоть до рабочего давления 23 МПа, на объекте акустическая эмиссия была крайне незначительной или вообще отсутствовала. При рабочем давлении, превышающем 23 МПа, зафиксировано внезапное появление большого числа сигналов АЭ, обладающих невысокой амплитудой. Распределение сигналов

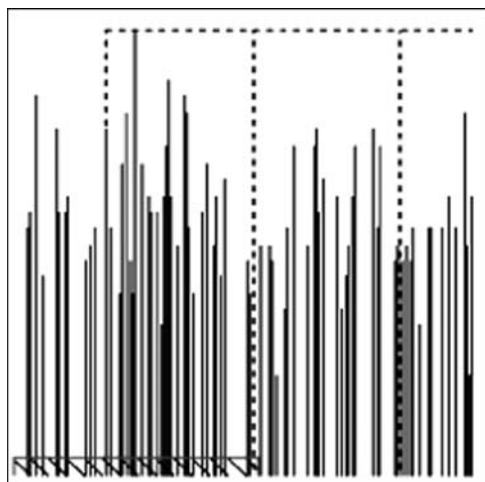


Рис. 10. АЭ на участке контроля до возникновения дефекта (объект G)

по контролируемому участку равномерное, без выраженной локализации. Дальнейшее наблюдение за объектом показало, что обнаруженная акустическая эмиссия не может относиться к развитию опасных дефектов основного металла изделия, и вызвана, по всей вероятности, технологическими шумами.

Было предложено обратить внимание на данный объект, с целью выяснения причин высокой акустической активности, не характерной для остальных контролируемых изделий. В момент фиксации такого уровня активности на объекте G остальные объекты характеризуются полным отсутствием дискретной акустической эмиссии, что и послужило основанием для усиления внимания к данному случаю.

Дальнейшее нагружение объекта G проходило без каких либо повреждений, однако 21.07.03 произошло частичное разрушение корпуса патрубка для размещения термопары, с последующей незначительной утечкой аммиака. Данный дефект не относится к основному металлу контролируемого

изделия, а указанный патрубок не являлся объектом контроля. Однако, он послужил источником повышенной акустической активности. Характер акустической эмиссии, вызванной данным дефектом (см. цв. вклейку, рис. 9), не мог рассматриваться как локальное разрушение основного металла, и в действительности не являлся таковым.

Тем не менее, следует отметить высокий уровень чувствительности системы ЕМА-3У, позволивший обнаружить (не квалифицируя) и дефект такого рода, не входивший в зону контроля.

Акустическая эмиссия, зарегистрированная после обнаружения указанного выше дефекта, носит такой же характер, как и до его появления. Таким образом, акустические волны, порожденные локальным дефектом, распространяются равномерно по всей поверхности объекта. Наибольшее количество сигналов АЭ, обозначенных на рис. 10 самым высоким заштрихованным прямоугольником, приблизительно соответствует месту последующего возникновения дефекта, однако локализация АЭ в данной зоне не наблюдается.

На основании анализа результатов испытаний были сделаны следующие выводы и рекомендации для служб технического надзора предприятия.

1. За время проведенных АЭ испытаний линии синтеза аммиака системой ЕМА-3У не было обнаружено опасных дефектов в основном металле и сварных соединениях контролируемых объектов.

2. Периодически во время подъема рабочего давления наблюдалась повышенная АЭ активность в объектах C, E, F, G (рис. 11). Рекомендуется проводить периодический (1 раз в 3-4 месяца) контроль данных объектов при штатном давлении.

3. Система ЕМА-3У показала высокую чувствительность к нетипичным дефектам, заблаговременно обнаружив повышенную акустическую активность в месте будущего частичного разрушения корпуса патрубка для размещения термопары.

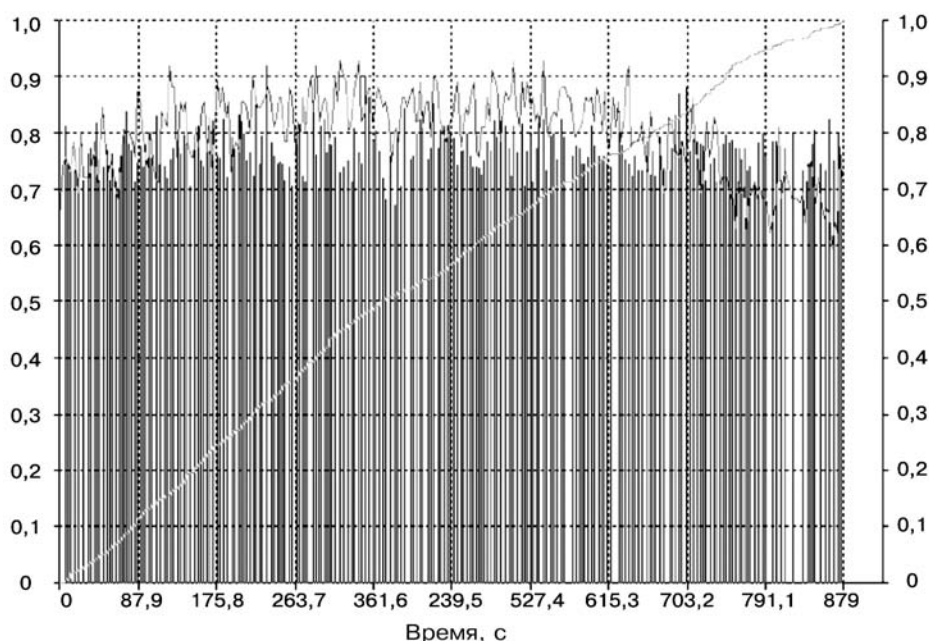


Рис. 11. Временная диаграмма АЭ на участке контроля после возникновения дефекта (объект G)



4. Для обеспечения безопасной эксплуатации и предотвращения развития опасных дефектов рекомендуется оснастить линию синтеза аммиака системой непрерывного АЭ мониторинга.

Последняя рекомендация должна быть рассмотрена более подробно.

Несмотря на проведенный контроль, который показал нормальное состояние контролируемых объектов, их дальнейшая эксплуатация сопровождается влиянием многочисленных факторов на несущую способность и остаточный ресурс. К таким факторам относятся циклические и случайные колебания температуры и рабочего давления, коррозионные процессы, изменения температуры внешней среды, ветровой нагрузки и т. д. [1]. Все эти факторы трудно или невозможно учесть в расчетах, особенно с учетом того, что многие объекты линии синтеза аммиака близки к исчерпанию своего расчетного ресурса. Материал после длительной эксплуатации может иметь другие химические и прочностные свойства, чем те, которые по существующим нормативам следует закладывать в расчет. Постепенное накопление рассеянных повреждений будет приводить к тому, что, в частности, твердость, измеренная в различных точках поверхности, будет существенно отличаться. Это может служить показателем поврежденности металла на отдельных участках [2], но, как и периодический контроль любым из существующих неразрушающих методов, не может гарантировать своевременного обнаружения опасных дефектов в объеме всей технологической линии.

Кардинальным решением указанной проблемы является внедрение систем непрерывного мониторинга, контролирующих все или большинство агрегатов технологической линии по схеме 24 ч в сутки — 7 дней в неделю. Системы непрерывного мониторинга ЕМА-ЗС в настоящее время используются для контроля хранилищ аммиака и могут быть применены для контроля линий синтеза аммиака. Наряду с параметрами сигналов акустической эмиссии, они регистрируют технологические

параметры, к важнейшим из которых относятся нагрузка (например, рабочее давление), деформация и температура. На базе анализа ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА (ВСМ), включающего эти параметры, системы ЕМА-ЗС выполняют прогноз разрушающей нагрузки и остаточного ресурса. Два вида прогноза — на текущий момент и долгосрочный — позволяют диагностическим службам своевременно принимать меры по устранению выявленных дефектов и изменению эксплуатационных параметров для обеспечения безопасной эксплуатации конструкций.

Использование современных компьютерных технологий не только позволило реализовать безотказную работу системы, но и решить вопрос доступа к результатам контроля для любого специалиста диагностической службы в любой момент времени. Доступ к диагностической системе в реальном времени посредством локальной компьютерной сети или Интернета решает на новом уровне задачу принятия решения о текущем состоянии объекта контроля и служит дополнительному повышению безопасности его эксплуатации.

Выводы

Проведенный диагностический контроль линии синтеза аммиака в пуско-наладочный период показал высокую эффективность применения АЭ диагностики для обеспечения безопасности одновременного ввода в эксплуатацию комплекса объектов технологической линии.

Наиболее перспективным направлением обеспечения безопасной эксплуатации линий синтеза аммиака и аналогичных сложных производств является оснащение их системами непрерывного АЭ мониторинга.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Изд-во «ИНДПРОМ». — 816 с.
2. Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 3–8.



ОЦІНКА НАКОПИЧЕННЯ ОБ'ЄМНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ ЗА СИГНАЛАМИ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ

Розроблено теоретичну модель кількісної оцінки об'ємної пошкодженості твердих тіл у пластично деформованому об'ємі за сигналами акустичної емісії в умовах дії квазістатичного навантаження. На основі створених автором оригінальних експериментальних методик досліджень перевірено основні положення моделі на низці найпоширеніших конструкційних сплавів та інших кристалічних тіл. Показано добре співпадіння отриманих теоретичних та експериментальних даних.

A theoretical model was developed of quantitative evaluation of the extent of damage in solids in a plastically deformed volume by the acoustic emission signals under quasi-static loading. Novel experimental research procedures, developed by the author, were the basis for verification of the main principles of the model for a range of the most widely used structural alloys and other crystalline bodies. A good coincidence of the derived theoretical and experimental data is demonstrated.

Підвищення ефективності роботи сучасного промислового обладнання, природне старіння будинків та інших цивільних споруд і конструкцій приводить до необхідності експлуатації їх за умов, які близькі до граничних. Тому все більше зростає потреба виявлення найнебезпечніших для міцності конструкцій дефектів типу тріщин в умовах деградації матеріалу внаслідок дії на нього корозійно-механічних чинників і різного роду фізичних полів. А це, в свою чергу, зумовлює проведення контролю локальних об'ємів дефектності цих об'єктів з достатньою достовірністю, щоб прогнозувати критичні ситуації та попередити руйнування. Важливість задачі важко переоцінити не тільки для таких відповідальних промислових об'єктів, які експлуатуються в атомній та тепловій енергетиці, хімічному та нафтохімічному виробництві, газо- та нафтотранспортних мережах, авіакосмічній техніці, але й в інших галузях життєдіяльності людини. Викладене вище особливо стосується України, де згадана проблема набула надзвичайної гостроти. Адже, наприклад, в теплоенергетиці більшість обладнання вичерпало свій розрахунковий ресурс. В інших галузях промисловості нашої держави ситуація не краща.

Як свідчить світова практика, сьогодні для розв'язання задач діагностування конструкцій та виробів надзвичайно актуальною є проблема вивчення механізмів і здійснення кількісної оцінки процесів зародження та розвитку мікро- та макротріщин в області пластичних деформацій (об'ємної пошкодженості) конструкційних матеріалів. Адже саме там відбуваються початкові стадії зародження руйнування, які є найтривалішими процесами у ланцюгу «зародження пошкодженості — субкритичний ріст макротріщин — завершальна стадія руйнування». Методи кількісної оцінки об'ємної пошкодженості матеріалу в області його пластичних деформацій в даний час розвинуті недостатньо. Поряд із цим ще навіть не вироблено єдиної думки щодо найінформативнішого підходу, тому часто в залежності від вибраного параметра,

якому ставиться у відповідність міра пошкодженості і спосіб її інтерпретування, отримують, відповідно, і різні значення шуканих величин. Виходячи із цього, актуальними є розробки нових фундаментальних підходів і створення на цій основі необхідних методологічних засад для інтегральної кількісної оцінки об'ємної пошкодженості матеріалу неруйнівними методами контролю. Суттєвий внесок у розв'язання окресленої проблеми може дати розвиток методів і засобів, котрі ґрунтуються на використанні сучасних досягнень механіки руйнування та нових фізичних досліджень.

Досвід останніх десятиріч показав великі потенційні можливості методу акустичної емісії (АЕ), який дозволяє оцінювати динаміку розвитку дефектів та міцнісні властивості матеріалів під час експлуатації об'єктів без порушення їх цілісності. Він вигідно відрізняється від інших неруйнівних методів можливістю дистанційного контролю всього об'єму матеріалу виробу, незалежно від його форми та розмірів, має високу чутливість, що дає змогу отримувати інформацію про руйнування на відстанях, які на порядки перевищують розміри первинних перетворювачів і величину дефектів, що розвиваються [1].

Пошкодження матеріалу розпочинається на самих ранніх етапах деформації і пов'язане із ростом наявних та виникненням нових суб- та мікродфектів. Так, в металах внаслідок рухливості вакансій останні можуть групуватися і утворювати мікропори, пустоти, котрі у полі напружень перетворюються в тріщини. Такі утворення здебільшого відбуваються на границях зерен. Скупчення дислокацій приводить до високих локальних розтягальних напружень, що породжують тріщину нормального відриву. Кількість згаданих дефектів в одиниці деформованого об'єму дуже велике — від 10^8 у кристалах NaCl до 10^{12} см⁻³ у кристалах Al та Ni за кімнатної температури [2].

Пошкодженість матеріалу можна розділити на розсіяні дефекти — малі за розмірами та множинні



в одиниці об'єму, і магістральні тріщини, котрі з'являються на завершальній стадії руйнування [3]. Елементарні акти та механізми виникнення дефектів і умови їх розвитку відомі лише наближено. Про формування кількісних характеристик, функцій розподілу, залежностей між випадковими дефектами говорити важко.

Обґрунтування підходу до визначення об'ємної пошкодженості твердих тіл і основні положення моделі [4]. Розвиток пластичних деформацій (ПД) у матеріалах супроводжується зародженням та ростом пор, руйнуванням різного роду включень, утворенням мікро- та макротріщин тощо. У рамках нашої моделі концептуально будемо розглядати матеріали, ПД яких відбувається через утворення у її об'ємі мікро- та макротріщин. Таким чином, якщо мати загальну суму $\sum S_i$ наростання площ таких дефектів новоутворених поверхонь S_i і зіставити її з об'ємом V , де вони утворилися і розвивалися, то можна отримати механічну міру пошкодженості ξ матеріалу в пластично деформованому об'ємі, тобто отримати інтегральну кількісну оцінку об'ємної пошкодженості (ОП).

Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що до моменту повного руйнування твердих тіл (ТТ) проходить довгий період часу, який пов'язаний із деформуванням матеріалу, зародженням і накопиченням пошкоджень. Якщо узагальнити вже відомі результати моделювання руйнування на основі кінетичної теорії, то спрощено можна представити таку послідовність розвитку пошкодженості ТТ. Навантажений зразок вважають таким, що складається із структурних елементів (СЕ), руйнування яких приводить до утворення мікротріщин. Зруйнування СЕ відбувається за рахунок перевищення напруження деякого критичного значення (силовий критерій руйнування) та термофлуктуацій напружень. На початковій стадії руйнування, коли є незначна кількість мікротріщин, руйнування СЕ статистично незалежне [5]. Із ростом концентрації мікротріщин мікротріщин і злиттям їх в асоціації — макротріщини (МТ), протікання руйнування визначається вже співвідношенням між структурною неоднорідністю матеріалу та неоднорідністю напружень, що зумовлена дефектами. У випадку малої структурної неоднорідності руйнування локалізується поблизу найбільших МТ, які ростуть, поглинаючи окремі мікротріщини чи їх дрібні асоціації. Одночасно із цим стабілізуються мікротріщини, які попали в область розвантаження матеріалу. Серед МТ виділяється магістральна тріщина, котра, досягнувши критичного розміру, спричинює зруйнування зразка. Коли велика структурна неоднорідність матеріалу порівняно із неоднорідністю напружень, руйнування характеризується множиною зародків руйнування. Тоді МТ розвиваються практично незалежно.

З утворенням МТ перерозподіляються напруження в її околі. За атермічного злиття МТ руйнуються СЕ в області взаємної нестійкості цих МТ. Швидкість об'єднання порядку 0,4...0,6 від швидкості звуку у матеріалі (швидкість закри-

тичного росту тріщин). Малий час процесу і дозволяє припустити, що в цьому випадку випромінюється одиничний імпульс акустичної емісії (АЕ) із амплітудою, яка пропорційна $\sqrt{\epsilon/\tau}$, де ϵ — енергія, достатня для руйнування СЕ в області між МТ, що зливаються. Для утворення та злиття МТ необхідна досить висока локальна концентрація одиничних мікротріщин (приблизно $10^9...10^{11}$ см⁻³ для чистих металів в умовах повзучості [6]), тому щоб цього досягнути потрібен деякий час. Ось чому на початковому етапі руйнування треба сподіватися низькоамплітудної АЕ, що характерна для утворення одиничних мікротріщин та їх дрібних асоціацій, а далі — руйнування з високоамплітудними сигналами АЕ (САЕ).

Оскільки сьогодні не існує прямих методів неруйнівного контролю (НК), які безпосередньо могли б визначати площі новоутворених поверхонь дефектів, то, як було зазначено вище, перспективним є залучення для цього саме методу АЕ. Однак, аналіз літературних даних щодо застосування АЕ до оцінки площ новоутворених дефектів і накопичення пошкоджень свідчить, що відомі поодинокі результати у цьому напрямку емпіричні, що суттєво обмежує їх кількісне використання у НК.

Отже, беручи до уваги висунуту вище концепцію, для побудови моделі кількісної оцінки об'ємної пошкодженості матеріалу в його пластично деформованому об'ємі (ПДО) висувуються такі гіпотези, виходячи із урахування лінійності накопичення пошкоджень у ТТ [3, 7, 8].

1. Механічну міру об'ємної пошкодженості матеріалу ξ можна визначати як відношення суми площ новоутворених дефектів S_i до об'єму, де вони утворилися V :

$$\xi = \sum S_i / V = S / V. \quad (1)$$

2. Величина ξ лінійно пропорційна справжній деформації (СД) ϵ полікристалічних тіл.

3. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості матеріалу ξ_1 визначається відношенням суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, де відбувається дефектоутворення.

4. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості матеріалу ξ_1 лінійно залежить від СД полікристалічних тіл.

5. Обидві міри об'ємної пошкодженості взаємно пропорційні.

Експериментальна перевірка положень моделі. Визначення співвідношень між механічною мірою ОП та СД для ТТ. Іонна будова кристалів. На основі праці [8], лінійними функціями можна описати зміну довжини одиничної мікротріщини та інтегральної довжини тріщин від СД під час деформування ТТ. Залежність $\xi - \epsilon$, яка побудована нами у результаті перерахунку даних, отриманих авторами у працях [2, 9, 10] (алгоритм розрахунку детально викладений у [11]) також добре апроксимується лінійною функцією виду $\xi = a\epsilon + b$ (рис. 1, а). Параметри апроксимації,

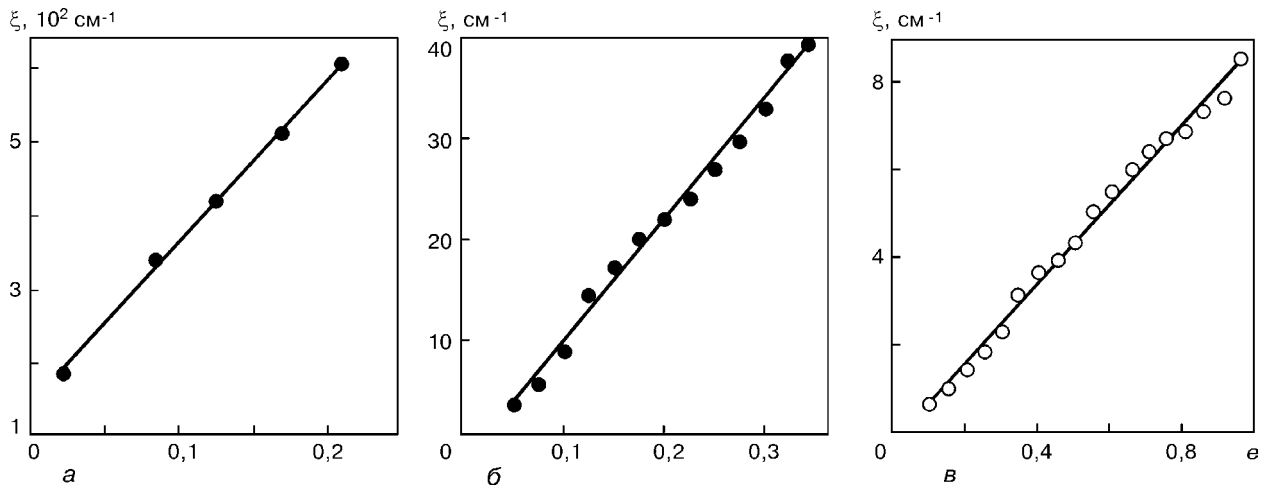


Рис. 1. Зміна механічної міри об'ємної пошкодженості ТТ від справжньої деформації: а — для кристалів NaCl (точки на графіках отримані з урахуванням даних праці [2]) та сплавів Д16-Т (б) і сталі 45 (в).

отримані методом найменших квадратів такі: $a = 278,04$; $b = 0,28$; $r = 0,998$ (r — коефіцієнт кореляції). Отже, проведені для NaCl дослідження підтверджують гіпотезу 2 моделі.

Експериментальна перевірка положення 2 моделі на сплавах. Алюмінієвий сплав. Випробовували циліндричні зразки АС марки Д16-Т. Оскільки в основі АС лежить алюміній, то він, в основному, і визначає їх фізико-хімічні властивості. Так, на відміну від NaCl, у кристалах Al утворення шийки не супроводжується виникненням пор, а відбувається шляхом розвитку мікротріщин, які зароджуються у смугах деформації. Отже АС добре задовільняють висунуту нами концепцію.

Циліндричні зразки АС марки Д16-Т розтягували на розривній машині типу FPZ-100/1 зі швидкістю переміщення рухомого затиску 4×10^{-7} м/с. Аналогічні сигнали із тензометричного динамометра сили та тензометричних перетворювачів видовження і зміни діаметра шийки у її найвужчому перерізі подавали на параметричні входи акустико-емісійного комплексу MISTRAS-2001 виробництва фірми РАС (США). Там їх відповідним чином оцифровували і після цього запам'ятовували на жорсткому диску. За отриманими даними будували необхідні діаграми і визначали СД. Розміри зразків для випроб, режими відбору, обробки та реєстрації САЕ приведено у роботі [11].

Для побудови залежності $\xi - \epsilon$ використовували, окрім отриманих експериментально діаграм $P - l$ та $P - d$, ще й деякі кількісні характеристики руйнування для даного матеріалу із праць [2, 9, 10]. Зокрема, кількість мікротріщин і їх розміри у відповідності до СД розтягу. Як впливає із рис. 1, б, отримана нами залежність $\xi - \epsilon$ добре апроксимується лінійною функцією з такими параметрами апроксимації: $a = 120,1$; $b = -2,23$; $r = 0,992$, що встановлені для 13 експериментальних точок.

Випробування циліндричних зразків зі сталі 45. За аналогічною схемою експерименту розтягували ідентичні за розмірами циліндричні зразки, що виготовлені з конс-

трукційної сталі 45. Результати випроб і відповідних перерахунків із використанням даних праць [2, 9, 10] показані на рис. 1, в. Тут також спостерігається добра лінійна апроксимація, побудована для 18 експериментальних точок, де $a = 915,2$; $b = -22,1$; $r = 0,992$.

Таким чином, за результатами проведених експериментальних досліджень можна констатувати, що підтверджується положення 2 нашої моделі для КТ різної будови.

Теоретичне обґрунтування наукового положення 3 моделі. У праці [12] створено розрахункову модель випромінювання пружних хвиль АЕ під час утворення мікротріщин у зоні інтенсивних ПД і розв'язана у переміщеннях відповідна динамічна задача, де враховано характерний час релаксації напружень на берегах мікротріщин [13]. Аналіз компонент вектора переміщень показав, що максимум його модуля визначається за апроксимаційною формулою [12]:

$$u_{\max} |_{c_i} = \frac{\beta_i \sigma_0 \Phi_i^{(\tau_r)}(\theta) r_0^2}{T_r \rho c_1^2 R}, \quad (2)$$

де β_i — числові множники пропорційності відповідно для поздовжньої ($i = 1$) та поперечної ($i = 2$) хвиль ($\beta_1 = 0,37$, $\beta_2 = 0,63$); σ_0 — напруження розриву матеріалу; $\Phi_i^{(\tau_r)}(\theta)$ — функції, що характеризують кутовий розподіл випромінювання поздовжньої і поперечної хвиль; r_0 — радіус дископодібної тріщини, $T_r = c_1 \tau_r / r_0$, τ_r — характерний час релаксації $\tau_r \geq r_0 / c_1$; ρ — густина матеріалу; c_1 — швидкість поздовжньої хвилі; R — мінімальна віддаль від контура тріщини до точки спостереження.

Залежність (2) дозволяє вважати, що величина $u_{\max} |_{c_i}$ пропорційна до площі S ($S = \pi r_0^2$) новоутвореного дефекту. Під час утворення декількох тріщин за умови $T_r \approx \text{const}$ відповідно матимемо

$$\sum_n A_n = a / T_r \sum_n S_n, \quad (3)$$



де A_n — амплітуда сигналу АЕ, яку вважаємо пропорційною до $u_{\max}|_{c_i}$; a — множник пропорційності, що визначається експериментально.

Залежності (2) та (3) на підставі [12, 14] можуть бути узагальнені на випадок утворення внутрішнього тріщиноподібного дефекту біля фронту МТ в області ПД із урахуванням впливу границь тіла та хвилевода на САЕ. Однак і в цьому випадку пропорційність між амплітудами САЕ, спричинених утворенням мікротріщин площею S у зоні ПД МТ зберігається як з урахуванням процесів релаксації напружень на його берегах, так і з урахуванням впливу границь тіла та хвилевода.

Підсумовуючи викладене, площу новоутворених дефектів опосередковано можна визначати за сумою амплітуд САЕ:

$$S = \beta \sum A_i, \quad (4)$$

де β — акустико-емісійна константа матеріалу, яка враховує його механічні характеристики (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, межу текучості) та режими відбору і реєстрації САЕ, $i = 1, 2, \dots, m$ — кількість САЕ, які зареєстровані у процесі деформування.

Отже за аналогією з формулою (1) можемо записати

$$\xi_1 = \beta \sum A_i / V. \quad (5)$$

Отримана величина ξ_1 і буде акустико-емісійною мірою ОП матеріалів.

Експериментальне визначення акустико-емісійної міри ОП та характеру її зміни від СД кристалічних тіл (перевірка положення 4 моделі). Дослідження АС. Як було зазначено вище, АС добре досліджені у літературі і нами вже використані деякі дані для підтвердження висунутих положення 2 моделі. В силу сказаного, виникла необхідність дослідити акустико-емісійну ОП перш за все АС, щоб порівняти отримані і відомі літературні дані.

У працях [15–17] нами апробовано методики, побудовані на використанні суми амплітуд САЕ як параметра оцінки площ новоутворених дефектів під час досліджень водневої деградації конструкційних сплавів і руйнування вуглецевих композитів. Показано, що методом АЕ можна визначити опосередковано площу новоутворених дефектів у зоні ПД за сумою амплітуд САЕ, використовуючи формулу (4). Із урахуванням цього, рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\xi = \alpha \xi_1, \quad (6)$$

де α — коефіцієнт пропорційності між механічною і акустико-емісійною мірами ОП матеріалу (базова константа).

Із формул (5) та (6) випливає, що для одного і того ж матеріалу за одних і тих же режимів роботи АЕ-апаратури константа α незмінна. В точці макроруйнування матеріалу критичною величиною останньої буде ξ_1^* , яку можна визначати експериментально. Тоді під час НК реальних виробів чи конструкцій критерієм, який визначає міру ОП конструкційного матеріалу до початку макроруйнування, є залежність

$$\xi_1 \leq \xi_1^*. \quad (7)$$

Випробовували циліндричні зразки із АС марки Д16-Т і 1201-Т розтягом на розривній машині типу FPZ-100/1 також зі швидкістю переміщення рухомого затиску 4×10^{-7} м/с. Щоб виключити вплив генерування САЕ від затисків машини на результати досліджень, зразки попередньо навантажували зашунтованими у спеціальній оправці [11], використовуючи ЕК [18]. Крім того, для уникнення впливу завад, які проходять мережею живлення, застосовували метод паралельного (індикаторного) каналу [19]. Після зняття оправки на розміщеному в затисках машини зразку, а саме на спеціально підготовленій шліфуванням поверхні лиски, встановлювали первинний перетворювач САЕ (ПАЕ), із якого електричні сигнали подавали на попередній підсилювач системи відбору та обробки САЕ типу MISTRAS-2001. Так отримували синхронний запис САЕ і характеристик навантаження зразків, за якими оперативно можна було слідкувати на екрані монітора в реальному часі. Для всіх зразків місце встановлення ПАЕ, режими відбору, підсилення та обробки САЕ були незмінними. Коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 80 дБ (40 дБ — попередній підсилювач) у смузі пропускання 0,1... 1,0 МГц, яка визначалася амплітудно-частотною характеристикою ПАЕ.

Отримані механічні характеристики зразків (табл. 1) суттєво відрізняються. Так, сплав Д16-Т має нижчі міцнісні показники і є пластичнішим, ніж сплав 1201-Т, проте має вищі критичні значення $\xi_{1(1)}^*$, хоч генерує САЕ менших середніх амплітуд упродовж розтягання. Це добре узгоджується із даними [20], де отримані кореляції між середньоквадратичними значеннями САЕ і деформацією зразків АС марки 2124-T851, що мали вісь навантаження, паралельну осі вальцювання та швидкість пластичної деформації $1,0 \times 10^{-3}$ с⁻¹. Встановлено наявність взаємозв'язку між міцнісними характеристиками матеріалу і сумою амплітуд САЕ, що реєструються від початку навантаження

Таблиця 1. Механічні характеристики АС

Марка сплаву	σ_p , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	S_b , МПа	S_k , МПа	δ , %	ψ , %	ψ_b , %	d_k , мм
Д16-Т	130,0	138,4	208,96	228,0	273,6	9,37	30,56	8,32	3,25
1201-Т	286,2	330,7	443,6	445,6	459,4	4,75	7,54	0,025	3,75

Примітка: S_b та S_k — справжні напруження утворення шийки та розриву АС; d_k — діаметр зразка в момент розриву.



зразків аж до повного їх зруйнування: що нижчі міцнісні характеристики матеріалу і що він в'язкіший, то більше значення суми амплітуд САЕ.

Проаналізуємо коротко за САЕ руйнування у АС, які застосовували у наших експериментах. На початкових стадіях навантаження у АС з'являються поодинокі САЕ з великими амплітудами від руйнування крихких включень [21, 22]. З наближенням до межі текучості інтенсивність їх наростає і такий характер генерації АЕ триває аж до утворення шийки. Далі розпочинається інтенсивне руйнування інтерметалідів та інших включень малих розмірів, розвиток дислокаційних переміщень із різними ступенями їх густини, зародження і розвиток МТ тощо зі зменшенням рівня САЕ у обох АС, але із суттєвим зростанням кількості сигналів (більше у Д16-Т). На цій стадії деформування також інтенсивно зароджуються та розвиваються мікротріщини, порушується когезія дрібних частинок у АС, що також є джерелом АЕ [21]. Такі механізми вступають у дію за величин $e_1 = 6,1 \dots 6,7 \%$ (Д16-Т) та $e_2 = 2,2 \dots 2,4 \%$ (1201-Т). На закритичній ділянці діаграми розтягу мікротріщини стрибкоподібно розвиваються [23, 24] аж до злиття їх у МТ і аналогічний розвиток останньої спричинює зростання амплітуд дискретних САЕ. Виявлено, що до утворення шийки (стрибок значень ξ_1 на кривих) акустико-емісійна ОП невелика і її значеннями можна знехтувати (для Д16-Т ξ_1 від моменту прикладання навантаження і до утворення шийки становить приблизно 11 % від $S_{1\max}$, а для сплаву 1201-Т цей показник приблизно рівний 14 %). Таким чином, накопичення ОП головно проходить після утворення шийки. Цю ділянку кривих можна апроксимувати лінійною залежністю виду $\xi_1 = ae + b$, а значення a , b та коефіцієнта кореляції r , були: $a = 0,91$; $b = -9,11$; $r = 0,972$ для Д16-Т та $a = 0,33$; $b = -0,23$; $r = 0,96$ — для 1201-Т.

Загалом же для цих зразків параметри апроксимації: $a = 0,74$; $b = -4,61$; $r = 0,929$ — для Д16-Т; $a = 0,33$; $b = -0,23$; $r = 0,959$ — для 1201-Т. Як бачимо (рис. 2), існує добра кореляція

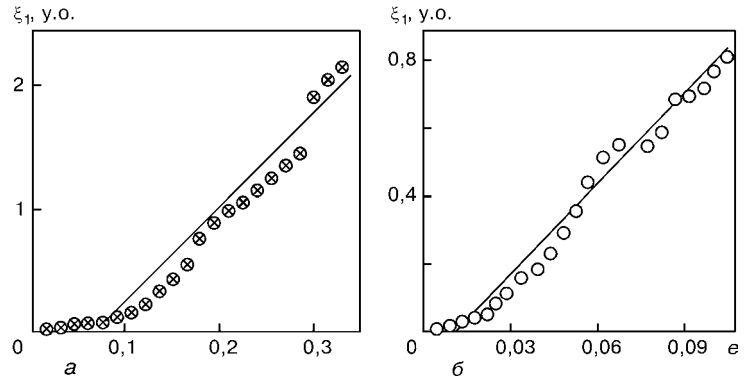


Рис. 2. Апроксимування залежностей $\xi_1 - e$ для зразків АС Д16-Т (а) та 1201-Т (б)

Таблиця 2. Параметри апроксимації залежностей $\xi_1 - e$ для КТ різної будови

Матеріал	a	b	r	α^*
NaCl	1,45	2,97	0,995	1,63
Д16-Т	0,017	0,069	0,978	0,027
1201-Т	0,048	0,24	0,996	0,054
38ХНЗМФА	0,034	2,4	0,996	0,031
45	0,1	6,96	0,998	0,13
20ХГСА	1,63	16,62	0,987	1,68

Примітка: α^* , $\text{см}^2/\text{у.о.}$ — усереднені значення константи.

між акустико-емісійною мірою ОП АС і динамікою зародження та розвитку руйнування у їх ПДО.

Випробування сталей. За такою ж як і для АС методикою нами проведено аналогічні експерименти з визначення ξ_1 для сталей 45, 38ХНЗМФА, і 20ХГСА. Розтягували циліндричні зразки 38ХНЗМФА діаметрами 4 і 6 мм. Схема експерименту, розміри зразків, геометрія розташування ПАЕ, режими відбору, обробки та реєстрації САЕ були аналогічними, як у випадку випроб АС. Слід окремо підкреслити, що тут і далі умовні одиниці (у. о.), в яких виражено пошкодженість, означають приведені до одного масштабу на виході реєстратора значення амплітуди огинаючої електричних сигналів у події АЕ за період часу 1 мс за однакових режимів їх відбору, підсилення АЕ-тракту (80 дБ) та реєстрації, що припадають на 1 мм^3 ($1 \text{ у.о.} = 40 \text{ мВ/мм}^3$).

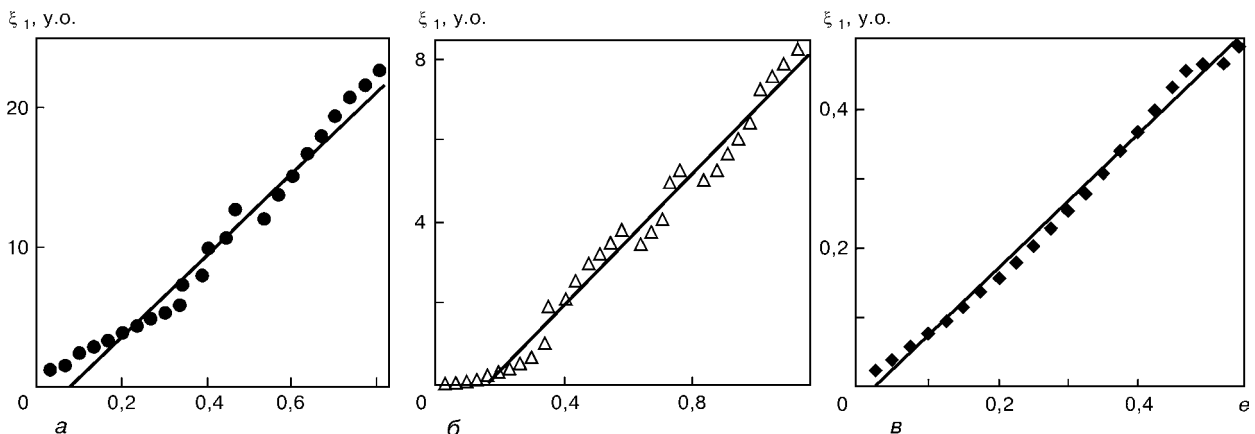


Рис. 3. Залежність акустико-емісійної міри ОП конструкційних сталей від СД: а — 38ХНЗМФА, б — сталь 45, в — 20ХГСА

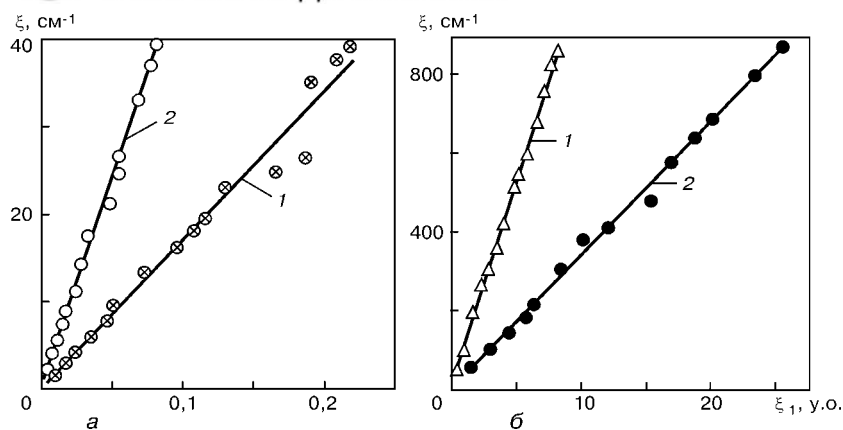


Рис. 4. Співвідношення між механічною ξ та акустико-емісійною ξ_1 мірами ОП: а — для АС Д16-Т (1) і 1201-Т (2); б — для сталей 45 (1) і 38ХНЗМФА (2).

Обробка результатів за викладеним вище алгоритмом показала, що отримані залежності також добре апроксимуються лінійними функціями (рис. 3 і табл. 2 з роботи [25]).

Оцінка співвідношень між акустико-емісійною мірою ОП та СД для полікристалів NaCl. Співвідношення встановлені нами з використанням експериментальних даних, що отримані в працях [2, 9, 10, 25–30].

Отримані залежності $\xi_1 - e$ для кристалів NaCl добре апроксимуються прямими, що описуються рівнянням $\xi_1 = ae + b$ з коефіцієнтом кореляції r : $a = 7252,2$; $b = -41,97$; $r = 0,983$ (I тип (див. [25]), 30 точок), $a = 4556,5$; $b = 35,5$; $r = 0,989$ (II тип, 36 точок).

Перевірка положення 5 моделі. Визначимо взаємозв'язок між механічною ξ та акустико-емісійною ξ_1 мірами ОП для монокристалів кухонної солі. З цією метою спочатку визначали коефіцієнт α , що пов'яже їх критичні значення. Для цього ми скористалися даними [9], де монокристали NaCl розтягали з постійною швидкістю за кімнатної температури прямо в камері скануючого мікроскопу. Зародження і ріст мікротріщин там відслідковували у залежності від деформації та тривалості навантаження. Зразки монокристалів розмірами $3 \times 3 \times 30$ мм³ мали вміст домішок менше 50 ppm із початковою густиною дислокацій приблизно 10^5 см⁻². Як показано вище, авторами [9] отримано лінійну залежність між сумарною довжиною мікротріщини, їх розмірами та деформацією кристалів. Там же встановлено, що мікротріщини мали гострі кінці і починали зароджуватися за деформації, котрі не перевищують 5 % від деформації руйнування. Виходячи із цих результатів, можна оцінити, що середня площа однієї мікротріщин становить приблизно $0,2 \times 10^{-4}$ см². Якщо ж взяти їх середню концентрацію $0,3 \times 10^8$ см⁻³ [9], то легко знайдемо міру механічної ОП, яка для наших кристалів становить $\xi^* = 6 \times 10^2$ см⁻¹. Наближено прийmemo, що пластичне деформування кристалів відбувається у повному їх об'ємі і тоді отримаємо $\alpha_1 = 1,53$ та $\alpha_2 = 2,18$ см²/у.о. відповідно для кристалів першого і другого типів. Далі, використовуючи описані нами підходи і поставивши у

відповідність значенню ξ величину ξ_1 для однієї і тієї ж СД e , за формулою (6) отримаємо біжучі величини константи α у діапазоні деформацій аж до руйнування зразка.

Для встановлення аналогічних співвідношень між ξ та ξ_1 у АС використовували отримані вище експериментальні дані, а константу α визначали у такий спосіб. Згідно з працею [2], в алюмінії під час його розтягування за кімнатних температур концентрація зародкових несутільностей (мікротріщин, субмікротріщин тощо) становить близько $(2,0 \dots 2,6) \times 10^{11}$ см⁻³, що відповідає деформації $e \approx 0,128 \dots 0,36$.

Там же показано, що за таких концентрацій дефектів середня довжина характерного для них розміру на мікрошліфах $L \approx (1,3 \dots 1,5) \times 10^{-7}$ м і не змінюється у процесі повзучості, тим часом як концентрація дефектів зростає лінійно зі збільшенням деформації. Отже, якщо прийняти дефекти дископодібними із діаметром $d = L$, то величина площі їх новоутворених поверхонь у ПДО монокристала алюмінію також змінюватиметься лінійно у вказаному діапазоні деформацій і становитиме $30,8 \dots 40,1$ см² на 1 см³ ПДО. Екстраполюючи отримані розрахункові дані стосовно наших АС і використовуючи експериментальні результати, визначали кількісні показники АЕ-константи для наших АС за аналогічною, як і для кам'яної солі, методологічною схемою.

Із експерименту випливає, що $\xi_{1(1)}^* = 2200$ у.о./см³, а $\xi_{1(2)}^* = 810$ у.о./см³ відповідно для Д16-Т та 1201-Т. Для обох сплавів прийmemo згідно з [20] $\xi^* = 40,1$ см⁻¹. Тоді значення відповідних констант для наших АС будуть $\alpha_1 = \xi^*/\xi_{1(1)}^* = 0,018$ та $\alpha_2 = \xi^*/\xi_{1(2)}^* = 0,049$ см²/у.о. А далі як і для полікристалів NaCl визначали біжучі значення константи α і будували залежності $\xi - \xi_1$ (рис. 4 і табл. 2).

Для сталей 45, 38ХНЗМФА і 20ХГСА константу α визначено, як і для описаних вище КТ, а результати експериментів приведено у [25].

Підсумовуючи результати теоретико-експериментальних досліджень даного і ураховуючи підтвердження істинності висунутих у моделі наукових положень, здійснення кількісної оцінки ОП матеріалу в його ПДО за амплітудами САЕ описується такими науково обґрунтованими послідовностями дій.

1. Кількісну величину механічної міри ОП визначаємо за формулою (1).

2. Для кількісної оцінки площ S новоутворених дефектів застосовуємо показник ΣA_i , сумуючи зареєстровані під час випроб авплітуди САЕ, що опосередковано відображають динаміку та кількісні характеристики дефектоутворення.

3. Для знаходження величини ПДО V на гладких зразках в кожному конкретному випадку ви-



користовуємо відповідно розроблені експериментальні методики, які базуються на сучасних науково-технічних підходах.

4. Акусто-емісійна міра ОП ξ_1 пропорційна ξ за однакових режимів підсилення, відбору і обробки САЕ, а також для одного і того ж значення коефіцієнта α , який визначаємо лабораторно.

Висновки

Кількісна оцінка механічної міри ОП ТТ ξ у розглянутих випадках може ефективно проводитись за амплітудами САЕ. Для цього необхідно попередньо встановити константу матеріалу α , що пов'язує між собою ξ та їх акустико-емісійну міру ОП ξ_1 .

Критерієм, котрий визначає початок макроруйнування ТТ, є встановлена у роботі залежність $\xi_1 = \xi_1^*$.

Зміна значень механічної ξ та акустико-емісійної ξ_1 ОП від справжньої деформації розтягу ϵ ТТ добре апроксимується лінійною залежністю.

1. Скальський В. Р. Розробка методик і засобів оцінки об'ємної пошкодженості та руйнування матеріалів та виробів за параметрами акустичної емісії. — Автореф. дис. ... доктора техн. наук. — Львів, 2003. — 36 с.
2. Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел. Сообщение 1,2. Деформация и развитие микротрещин / В. И. Бетехтин, В. И. Владимиров, А. Г. Кадомцев, А. И. Петров // Проблемы прочности. — 1979. — № 7. — С. 38 — 44; 1979. — № 8. — С. 51—57.
3. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — С. 138—153.
4. Скальський В. Р. Акустико-емісійне визначення накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2003. — № 2. — С. 84—92.
5. Баранов В. М., Кудрявцев Е. М. Использование кинетической теории разрушения для определения параметров акустико-эмиссионных сигналов при докритическом росте трещин в твердых телах / Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. — Л.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1986. — С. 22—27.
6. Владимиров В. И., Орлов А. Н. Термически активированное зарождение микротрещин в кристаллах // Проблемы прочности. — 1971. — № 2. — С. 36—38.
7. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966. — 752 с.
8. Robinson E. L. Effect of temperature variation on the long time rupture strength of steels // Trans. ASME. — 1952. — 74, № 5. — P. 68—76.
9. Шмидт Ф., Альбрехт Р., Бетехтин В. И. Микроразрушение кристаллов, находящихся в сравнительно хрупком состоянии / Проблемы физики твердого тела и материаловедение. — М.: Наука, 1976. — С. 56—59.
10. Бетехтин В. И., Шмидт Ф. Микроразрушение кристаллических материалов, находящихся в пластичном состоянии / Там же. — С. 60—69.
11. Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Сергієнко О. М. Визначення об'ємної пошкодженості алюмінієвих сплавів за сигналами акустичної емісії // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2001. — № 3. — С. 77—90.
12. Analysis of acoustic emission caused by internal crack / O. Ye. Andreykiv, M. V. Lysak, O. M. Serhienko, V. R. Skalsky. // Eng. Fract. Mech. — 2001. — Issue 11. — 68, № 7. — P. 1317—1333.

13. Каплицкий М. А., Паринов И. А., Рожнов Е. В. Асимптотика точного решения задачи о трещине нормального отрыва и определение ее длины по сигналам акустической эмиссии // Тез. докл. 1 Всесоюз. конф. «Акустическая эмиссия материалов и конструкций». Ч. 1. — Ростов н/Д, 1984. — С. 7—8.
14. Андрейків О. І., Сергієнко О. М., Скальський В. Р. Актуальні питання відбору і передачі сигналів акустичної емісії під час росту внутрішніх тріщин // Відбір і обробка інформації. — 2001. — № 15 (91). — С. 51—59.
15. Андрейків О. І., Скальський В. Р., Сергієнко О. М. Акустико-емісійні критерії для експрес-оцінки внутрішніх пошкоджень композитних матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2001. — № 1. — С. 91—100.
16. Скальський В. Р., Андрейків О. І., Сергієнко О. М. Оцінка водневої пошкодженості матеріалів за амплітудами сигналів акустичної емісії // Техн. диагностика і неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 17—27.
17. Андрейків О. І., Скальський В. Р., Гембара О. В. Метод оцінки високотемпературного водневого руйнування біметалевих елементів конструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2000. — № 4. — С. 15—22.
18. Kaiser J. Untersuchungen uber das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch. // Ph. D. Thesis. Technische Hochschule. — Munchen: Munich, Germany. — 1950. — 123 p.
19. Патент України №2914. МПК: G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів / Андрейків О. І., Скальський В. Р., Лисак М. В. Опубл. 26.12.94. Бюл. 5—1.
20. Hamstad M. A., Bianchetti R. and Mukherjee A. K. A correlation between acoustic emission and the fracture toughness of 2124-T851 aluminium // Eng. Fract. Mech. — 1977. — 9, №3. — P. 663—674.
21. Bianchetti R., Hamstad M. A. and Mukherjee A. K. Origin of burst-type acoustic emission in inflated 7075-T6 aluminium // J. Test. and Eval. — 1976. — 4, № 5. — P. 313—318.
22. Hamstad M. A., Bianchetti R. and Mukherjee A. K. A correlation between acoustic emission and the fracture toughness of 2124-T851 aluminium // Eng. Fract. Mech. — 1977. — 9, № 3. — P. 663—674.
23. Sklarczyk C. The acoustic emission of the crack processes in alumina // J. Europ. Ceramic Soc. — 1992. — 9, № 3. — P. 427—435.
24. Merkert P., Hoffman M. and Rodel J. Detection of prefracture microcracking in Al_2O_3 by acoustic emission // Ibid. — 1998. — 18, № 12. — P. 1645—1654.
25. Скальський В. Р. Залежність суми амплітуд сигналів акустичної емісії від справжньої деформації кристалічних тіл // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2002. — № 2. — С. 91—96.
26. Kim H. C. Characterization of mechanical properties by acoustic emission using an energy criterion. / Proc. IEEE Ultrasonics Symp., Los Angeles, 1975. — New York, 1975. — P. 591—596.
27. Эберт Г. Краткий справочник по физике / Под ред. К. П. Яковлева. — М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1963. — 552 с.
28. Рыскин В. С., Бетехтин В. И., Слуцкер А. И. Зарождение микроскопических трещин в деформированных кристаллах NaCl // Изв. АН СССР. Сер. физическая. — 1973. — 37, № 11. — С. 2439—2442.
29. Шмидт Ф., Бетехтин В. И. Образование микротрещин при деформировании NaCl // Физика металлов и материаловедение. — 1973. — 15, вып. 4. — С. 891—892.
30. Бетехтин В. И., Шмидт Ф., Заринов А. Кинетика микроразрушения NaCl // Физика твердого тела. — 1975. — 17, № 3. — С. 871—876.

На основании выдвинутой концепции разработана модель количественной оценки объемной поврежденности твердых тел в пластически деформированном объеме по сигналам акустической эмиссии. Модель учитывает принцип линейного суммирования повреждений и полученное решение в перемещениях динамической задачи об образовании изолированной микротрещины нормального отрыва в зоне интенсивных пластических деформаций. Основные научные положения модели подтверждены экспериментальными исследованиями и литературными данными.

Изложены теоретико-экспериментальные предпосылки для создания методик и средств количественной оценки объемной поврежденности твердых тел. Объектом исследований служит зарождение и развитие



микро- и макродефектов в пластически деформированном объеме конструкционного материала и вызываемые ими упругие динамические поля. С учетом принципа линейного суммирования повреждений разработана модель количественной оценки объемной поврежденности твердых тел. Ее научные положения заключаются в следующем. **1.** Постулируется, что механическую меру объемной поврежденности материала можно определить как отношение суммы площадей новообразованных дефектов S_i к объему, в котором они образовались V : $\xi = \sum S_i / V = S / V$. **2.** Механическая мера объемной поврежденности линейно пропорциональна истинной деформации ϵ поликристаллических тел. **3.** Вводится понятие акустико-эмиссионной меры объемной поврежденности материала ξ_1 , которая определяется как отношение суммы амплитуд сигналов АЭ к объему, в котором происходит дефектообразование. **4.** Акустико-эмиссионная мера объемной поврежденности материала ξ_1 линейно зависит от истинной деформации поликристаллических тел. **5.** Механическая мера объемной поврежденности ξ пропорциональна акустико-эмиссионной мере объемной поврежденности материала ξ_1 .

С использованием этих положений модели созданы методологические основы для количественной оценки объемной поврежденности материала в пластически деформированном объеме и определены модельные константы материала, связывающие механическую и акустико-эмиссионную меры объемной поврежденности для ряда конструкционных материалов различного кристаллического строения.

Фіз.-мех. інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
Львів

Надійшла до редакції
13.10.2003



АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В НЕФТЕХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

НЕДОСЕКА А. Я., АГАРКОВ С. В., ОВСИЕНКО М. А., ХАРЧЕНКО Л. Ф., ЯРЕМЕНКО М. А.

Представлены результаты акустико-эмиссионного (АЭ) контроля типичного объекта нефтехимической промышленности. Показана возможность регистрации сигналов акустической эмиссии в местах расслоений.

The paper presents the results of acoustic emission (AE) control of a typical object of petrochemical industry. The possibility is demonstrated of recording the acoustic emission signals in the places of delamination.

На предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли достаточно большое количество сварных оболочечных конструкций различного назначения активно эксплуатируются уже более 25 лет. В частности, это хранилища жидкого полипропилена, выполненные кузнечно-прессовой сваркой, изготовленные в 1933-1934 гг.

Наиболее распространены хранилища цилиндрической формы, объемом 200 м³. Длина таких хранилищ 22000...23000 мм, диаметр 3400 мм, толщина стенки достигает 26 мм, внутреннее рабочее давление 1,8 МПа. В основном они изготовлены из сталей 09Г2С и 16ГС (рис. 1).

Неразрушающий контроль (НК) технического состояния таких изделий представляет собой сложную задачу, так как эти объекты имеют большие геометрические размеры, часто расположены на опорах на высоте 6...8 м над землей, снаружи защищены теплоизоляционными покрытиями. При техническом освидетельствовании таких изделий частично контролируются сварные соединения, околошовная зона, выборочно замеряется остаточная толщина стенки, проводится внутренний осмотр. Процесс выполнения таких работ достаточно трудоемкий, требует высокой квалификации персонала, длительного времени проведения обследования, дополнительных технических средств для проведения работ на высоте и т. п. При этом всегда остается большая площадь изделия, не охваченная контролем. Да и оценка влияния обнаруженного дефекта

на дальнейшую работоспособность конструкции не всегда является простой задачей.

Значительно сократить время проведения и повысить достоверность контроля состояния металлоконструкций можно за счет применения АЭ метода, который все более широко используется для решения таких задач.

Контроль за состоянием объекта начинается, как правило, с изучения технической документации на объект, условий его эксплуатации, результатов предыдущих обследований. Затем непосредственно на объекте проводятся предварительные работы по определению его контролепригодности, измеряется коэффициент затухания акустических волн в данном материале, определяется оптимальное количество приемников АЭ сигналов, выбирается и в дальнейшем уточняется схема звуколокации источников АЭ.

На одном из нефтеперерабатывающих заводов в течение трех лет были проведены АЭ обследования хранилищ жидкого полипропилена.

Предварительные работы по подготовке контроля и сам контроль проводились в соответствии с требованиями ДСТУ 4046-2001 «Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств», Приложение Б; СТП 50.01-2000 «Техническая диагностика. Котлы, сосуды под давлением и трубопроводы. Акустико-эмиссионный метод контроля», Р50.01-01 «Рекомендації щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки», а также ряда других нормативных документов. Подготовка

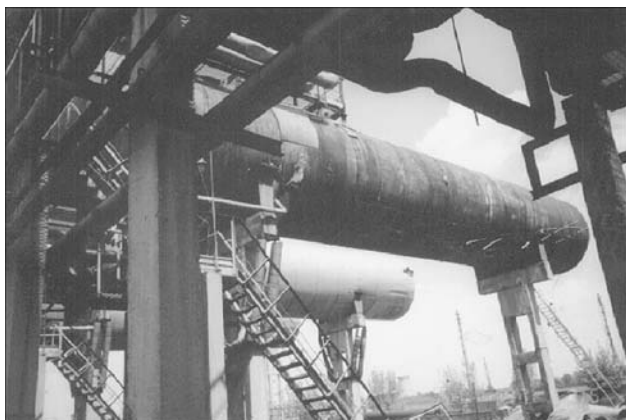


Рис. 1. Хранилище жидкого полипропилена



Рис. 2. АЭ контроль хранилища (стрелками показаны места установки датчиков на поверхности объекта)

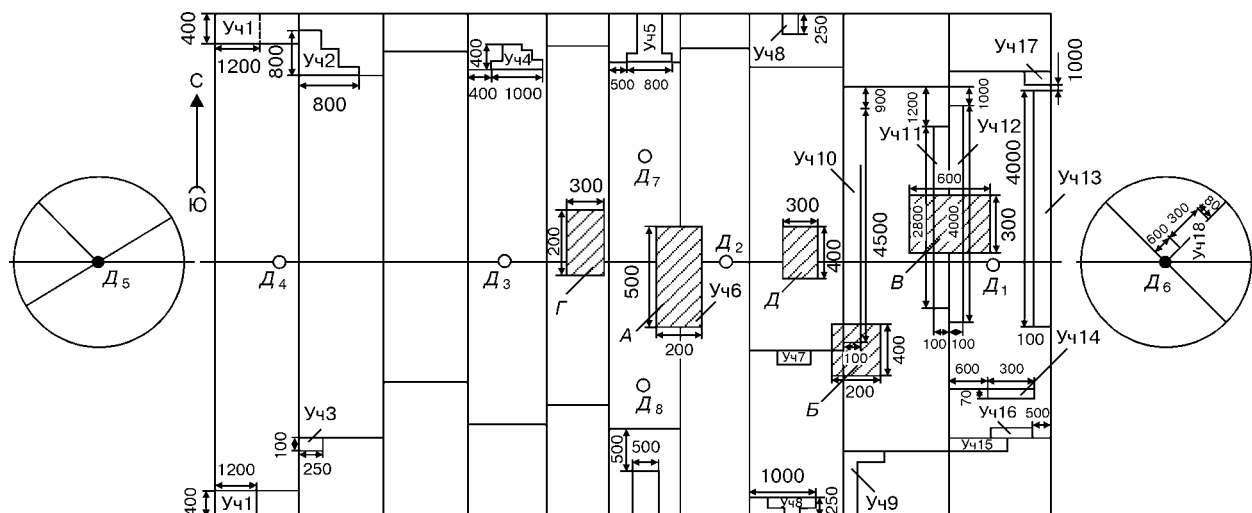


Рис. 3. Раскрой объекта контроля с указанием мест установки датчиков АЭ и дефектов, обнаруженных методом АЭ и другими неразрушающими методами контроля

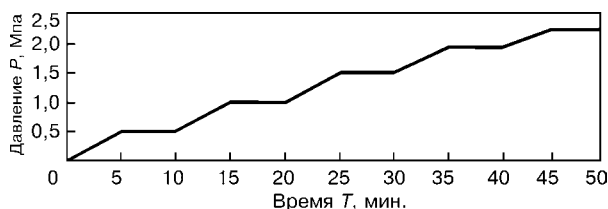


Рис. 4. Схема нагружения хранилища жидкого полипропилена

ленный к проведения контролю объект показан на рис. 2.

Рассмотрим результаты контроля одного из таких хранилищ. После ознакомления с результатами предыдущих обследований данного изделия НК методами контроля, проведенного специалистами завода, на развертке хранилища были отмечены те места, где имелись дефекты различного происхождения. В основном это были расслоения, поры, шлаковые включения, коррозия. Раскрой изделия и нанесенные на нем ранее обнаруженные дефектные области, а также места установки акустических датчиков ($D_1 - D_8$) приведены на рис. 3. Ранее обнаруженные 18 дефектных областей на рисунке отмечены как $Уч1 - Уч18$, а также даны размеры этих областей.

Для контроля изделия 8-миканальным АЭ прибором ЕМА-2 датчики АЭ были сгруппированы в две линейные антенны и две зонные антенны. Первая линейная антенна (датчики $D_1 - D_4$) была установлена на верхней осевой линии цилиндрической обечайки, вторая (датчики D_7 и D_8) — на боковой поверхности цилиндрической обечайки. Датчики D_5 и D_6 установлены на днищах (полусферах) хранилища.

Контроль за состоянием изделия проводили в процессе поднятия внутреннего давления в хранилище от 0 до 2,25 МПа ступенчато с пятиминутными контрольными выдержками согласно СТП50.01-2000 (рис. 4).

Обработка результатов АЭ контроля показала наличие зон повышенной акустической активности. Эти зоны были также нанесены на дефектовочную карту. На рис. 3 эти зоны пред-

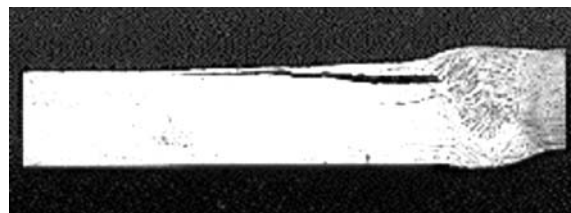


Рис. 5. Элемент оболочки хранилища с расслоением металла у сварного шва

ставлены в виде заштрихованных областей А, Б, В, Г и Д с указанием их размеров.

Анализируя дефектовочную карту, можно отметить, что большая часть из ранее установленных методами НК дефектных участков (это участки 1-5, 7-9, 13-18) не проявила акустической активности.

На участках А, Б, В, Г и Д зарегистрированы сигналы АЭ, свидетельствующие о наличии развивающихся дефектов или процессов, влияющих на изменение свойств материала конструкции. Амплитуда и интенсивность АЭ сигналов незначительны. Преимущественно уровень амплитуд единичных импульсов составлял 30...50 мВ.

Следует отметить наличие участков, где результаты предварительного НК и АЭ контроля совпадают с результатами проведенных пневмоиспытаний. Область А совпадала с участком 6, область Б частично совпала с участком 10, а область В частично совпала с участками 11 и 12.

Для более детального исследования участков изделия с повышенной акустической активностью из стенки сосуда были вырезаны образцы металла. Визуальное обследование образцов металла показало, что в основном металле имеются расслоения, расположенные параллельно внешней и внутренней поверхности металла. В металле шва таких расслоений не обнаружено (рис. 5).

Проведено исследование локального содержания и распределения водорода в металле образца по разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины методике локального масс-спектрального анализа с лазерным микрозондом. В соответствии с этим методом луч лазера расплавляет



Уровень остаточного водорода в металле в аналитических точках ($1 \text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ мас. \%} = 1,12 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$)

Номер аналитической точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Уровень остаточного водорода, ppm	1,29	1,29	11,82	17,00	4,15	12,92	3,75	2,26	5,18	2,50	1,88	1,88

в заданной точке поверхности образца металл, помещенный в камеру с высоким вакуумом. Газы (например, водород), находящиеся в этом микро-расплаве, экстрагируются из металла в полость камеры и регистрируются масс-спектрометром как разница с фоновым уровнем. Количество выделившегося водорода пропорционально его содержанию в этом участке металла и объему микро-расплава. Для количественных измерений используются стандартные образцы по водороду. Схема размещения аналитических точек на поверхности образца представлена на рис. 6, результаты измерений — в таблице.

Следует отметить, что концентрация водорода в металле резко (в 10...15 раз) повышается в районе расслоений (в 11...17 раз) по сравнению с областями материала вдали от расслоений, где эта концентрация составляет 1...1,3 раз в основном металле и 1,8...1,9 — в сварном шве. Эти результаты относятся к остаточному водороду. В реальном металле упомянутого хранилища содержание водорода в зоне расслоений очевидно выше, так как большая часть должна теряться в процессе вырезания темплета из сосуда, изготовлении образца и т. п.

В процессе эксплуатации сосуда водород из его внутренней полости диффундирует в стенки металла и скапливается у барьеров. Такими барьерами могут быть колонии перлита (карбидные слои). Водород может скапливаться на межфазной поверхности металл-карбид. В этом случае возможно образование молекул водорода либо взаимодействие с карбидом с образованием углеводородных соединений (например, CH_4 , C_2H_2), H_2 или другие водородосодержащие соединения (типа H_2S , SiH_4 , H_2O и т.д.). В итоге это может привести к появлению микротрещин, которые будут развиваться в расслоя.

При поднятии внутреннего давления в хранилище $P_{\text{вн}} > 2,2 \text{ МПа}$ были зарегистрированы сигналы АЭ, свидетельствующие о возможном протекании в материале описанных выше процессов.

Дополнительные измерения остаточной толщины стенки и уровня механических напряжений в местах, где совпадают результаты НК и АЭ (на рис. 3 это области А, Б, В), показали, что их значения не выходят за уровень допустимых.

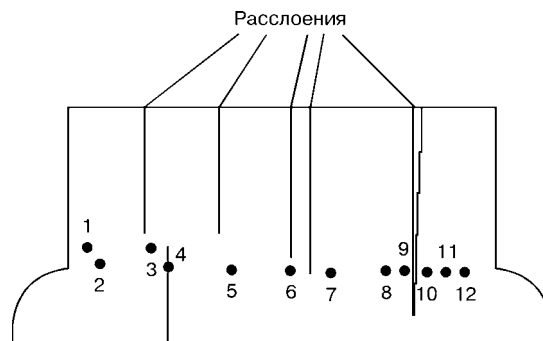


Рис. 6. Схема расположения аналитических точек на образце из стали 09Г2С

Дальнейшая эксплуатация хранилища в настоящее время ведется при ежеквартальном АЭ контроле тех участков, где были установлены слабоинтенсивные процессы дефектообразования. Это позволяет повысить надежность эксплуатации конструкции.

Таким образом, на примере обследования хранилища жидкого полипропилена показана высокая эффективность применения метода АЭ контроля. Этот метод позволяет обследовать 100 % поверхности испытуемого объекта, включая и труднодоступные, а иногда и просто недоступные для других методов контроля места. Благодаря высокой чувствительности, метод АЭ позволяет обнаружить дефекты на ранней стадии поднятия давления при регламентных испытаниях, что значительно повышает их безопасность.

Применение метода АЭ совместно с другими методами НК позволяет значительно повысить вероятность обнаружения дефектов и сделать выводы о степени их опасности.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев, Индпром. — 2001. — 815 с.
2. ДСТУ 4046-2001. Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств.
3. Р 50-01-01. Рекомендації щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки. — Київ, ТКУ-78 «ТДНК».
4. СТП 50.02-2000. Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Загальні технічні вимоги. — Київ, ТКУ-78 «ТДНК».

ПОДГОТОВКА И АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ И РАЗРАБОТКА НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ В НАПРАВЛЕНИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ «ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

А. А. ГРУЗД, А. К. БАЖЕНОВ, С. А. АНДРЕЕВ

Повышенные требования к прочности и надежности в эксплуатации сварных конструкций, объектов и сооружений (далее — объектов), а также требования к квалификации специалистов, обслуживающего персонала и экспертов, занятых их диагностическим контролем, обследованием и экспертной оценкой, диктуют необходимость планомерной организации и поддержания сферы их обучения, подготовки и аттестации.

Начиная с 1994 г. на базе Технического комитета Украины по стандартизации № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТКУ-78 «ТДНК») и Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины действуют курсы обучения и подготовки специалистов, обслуживающего персонала и экспертов в области технической диагностики (ТД). За этот период в ТКУ-78 «ТДНК» подготовлено более 900 специалистов в области ТД, имеющих соответствующую своей специальности предварительную подготовку в вузах и на целевых курсах, а также достаточный опыт в сфере диагностического контроля.

Следует отметить, что и в настоящее время активной деятельностью широкого круга заинтересованных предприятий, организаций и ведомств поддерживаются система и программы широкой подготовки, аттестации и сертификации персонала и экспертов в области ТД. Это в первую очередь подготовка специалистов в системе вузов Украины: Львовском политехническом институте по подготовке специалистов сварочного производства; Киевском национальном университете им. Т. Г. Шевченко, использующем в своей практике достаточно высокий уровень специализированной подготовки студентов различной специализации в области физических основ акустической эмиссии, теории упругости, механики разрушения. Интерес к специализации в области ТД проявляют и другие высшие учебные заведения.

В программах предусмотрены следующие виды подготовки: подготовка специалистов в системе вузов; послевузовская подготовка; подготовка операторов и технического персонала среднего уровня; персонала акустико-эмиссионного (АЭ) контроля; обслуживающего персонала объектов на промышленных предприятиях; технических экспертов по работе с объектами различного назначения в

системе ТКУ-78 «ТДНК» и Госнадзорохрантруда Украины.

ТКУ-78 «ТДНК» и Главным учебно-методическим центром (ГУМЦ) Госнадзорохрантруда Украины разработан и внедрен ряд совместных учебно-методических программ и планов по ТД объектов повышенной опасности в эксплуатации, которыми предусматриваются как начальная, так и повторная формы обучения, а также повышение квалификации, а именно:

«навчально-тематичний план підготовки технічних експертів, які виконують роботи з АЕ контролю на об'єктах котлонагляду, газонафтохімічного комплексу та підйомних спорудах;

навчально-методичний план підготовки технічних експертів експертно-технічних центрів, які виконують роботи на об'єктах котлонагляду;

навчально-тематичний план підготовки технічних експертів ЕТЦ, які виконують роботи на об'єктах газонафтохімічних виробництв, з питань застосування засобів технічного діагностування;

навчально-тематичний план підготовки технічних експертів ЕТЦ, які виконують роботи на об'єктах котлонагляду, з питань застосування засобів технічного діагностування (повторне навчання);

навчально-тематичний план підготовки технічних експертів ЕТЦ, які виконують роботи на підйомальних спорудах, з питань застосування засобів технічного діагностування (повторне навчання)».

Приводим одну из недавно разработанных программ подготовки специалистов по АЭ диагностическому контролю, который применяется при технической экспертизе объектов ответственного назначения, включая непрерывный мониторинговый диагностический контроль. Это комплексная программа подготовки технических экспертов, которые выполняют работы по АЭ контролю на объектах котлонадзора, газонефтехимического комплекса и подъемных сооружений, рассчитанная на срок обучения 24 дня (4 недели) с режимом обучения — 8 ч ежедневно, форма обучения — с отрывом от производства. Количество часов — 192, из них — 144 ч лекционных, 48 ч — практические занятия.

Программа включает два раздела: на базе ТКУ-78 «ТДНК» — 2 недели и на базе ГУМЦ Госнадзорохрантруда Украины — 2 недели.

Первый раздел состоит из ряда тем, посвященных конкретным вопросам теорий, практики и средствам технического диагностирования, включая темы:

- общие положения по контролю, испытаниям и диагностированию объектов повышенной опасности;
- нормативно-методическое обеспечение работ по контролю и диагностированию;

- практика и промышленное использование АЭ средств контроля и диагностирования на объектах контроля: котлы, сосуды, работающие под давлением, резервуары, трубопроводы: технологические и газонефтегазотранспортные, нагруженные конструкции, грузоподъемные сооружения и т. п.;

- типовая методика диагностических испытаний и контроля;

- акустическая эмиссия, АЭ диагностирование и контроль, АЭ средства и их применение;

- теоретические вопросы АЭ, АЭ аппаратура;

- практические занятия с использованием средств ТД, образцов материалов и макетов конструкций: компьютерное и математическое обеспечение, контроль напряженно-деформированного состояния, упрочняющая и релаксационная обработка сварных соединений и т. п.

Второй раздел программы состоит из специфических тем Госназдорхрантруда Украины, а именно:

- цели и организация экспертного обследования объектов, экспертные центры и организации;
- законодательная и нормативно-правовая база по охране труда в Украине;

- закон Украины «Об объектах повышенной опасности»;

- законодательство Украины о метрологии и сертификации;

- требования правил об устройстве и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов;

- требования правил об устройстве и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением;

- требования правил об устройстве и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды;

- требования правил об устройстве и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов;

- требования правил об устройстве и безопасной эксплуатации объектов газо- и нефтехимических производств;

- контроль производства, монтажа, настройки, реконструкции и ремонта объектов котлонадзора, подъемных сооружений и объектов газонефтехимического комплекса;

- регистрация и техническое освидетельствование объектов котлонадзора, подъемных сооружений, объектов газонефтехимического комплекса; разрешение на эксплуатацию таких объектов.

В соответствии с приведенной программой подготовку и аттестацию на базе ТКУ-78 «ТДНК» и ГУМЦ Госназдорхрантруда Украины прошла первая группа специалистов, которые имеют многолетний практический опыт экспертно-диагностических работ на ответственных объектах, а также получили соответствующую теоретическую вузовскую подготовку и подготовку на целевых

курсах и являются дипломированными техническими экспертами в областях котлонадзора, газонефтехимического комплекса или подъемных сооружений. Эти специалисты представляют следующие ведущие предприятия, организации и экспертно-технические центры Украины: ОАО МК «Азовсталь», ОАО «Лисичанскнефтехимсинтез», ГП «Одесский припортовый завод», Приднепровский экспертно-технический центр, УМГ «Киевтрансгаз», Сумской экспертно-технический центр, испытательный центр «Азовмаштест», ГП «Центр сертификации», МГП «Индром» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ГП «Аттестационный центр неразрушающего контроля» при ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Составлен перспективный план подготовки специалистов по АЭ диагностированию для других заинтересованных предприятий и организаций.

Естественно, что становление такого важного научно-прикладного направления, как «Техническая диагностика сварных конструкций» зависит от подготовки и аттестации специалистов и создания нормативно-методической базы, а также обеспечения современными средствами технического диагностирования. В данной сфере ТКУ-78 «ТДНК» также сотрудничает с Госназдорхрантруда Украины.

Реализуется программа по разработке и выпуску в свет нормативных документов всех уровней: от стандартов предприятий, технических комитетов и обществ и до государственных — ДСТУ. Эти документы учитывают и основываются на трех базовых новых законах Украины, подготовленных Госстандартом Украины и принятых Верховным Советом Украины в середине 2001 г.: о стандартизации, о подтверждении соответствия и об аккредитации органов по оценке соответствия.

ТКУ-78 «ТДНК» подготовил и выпустил в свет пакет из пяти стандартов, которые решают организационно-технические вопросы. В частности, они регламентируют требования к персоналу, к лабораториям, действующим в области ТД и НК, требования к центрам подготовки и аттестации персонала. Два из указанного пакета стандарта посвящены конкретным технологиям диагностирования: первый — процедурный документ для объектов: котлы, сосуды давления и трубопроводы; второй представляет технологию АЭ диагностирования объектов повышенной опасности.

Завершена работа и выпускаются два государственных стандарта:

- ДСТУ 4223-2003. «Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги»;

- ДСТУ 4227-2003. «Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки».

Выпущен и внедряется стандарт Р 50.01-01. «Рекомендації щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки».

Приводим перечень основных документов из нормативно-методического обеспечения программ подготовки специалистов, а также обеспечения

практических работ на реальных объектах, которые разработаны в рабочих группах ТКУ-78 «ТДНК», а также нормативные документы других стран, принятые Госстандартом Украины.

ДСТУ 1.1-2001. Державна система стандартизації. Стандартизація та суміжні види діяльності. Терміни та визначення основних понять.

ДСТУ 2374-94. Розрахунки на міцність та випробування технічних виробів. Акустична емісія. Терміни та визначення.

ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Термін та визначення.

ДСТУ 3412-96. Система сертифікації УкрСЕПРО. Вимоги до випробувальних лабораторій та порядок їх акредитації.

ДСТУ 4046-2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги.

ДСТУ EN 45002-98. Загальні вимоги до атестації випробувальних лабораторій.

ГОСТ 30489-97 (EN 473-92). Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования.

ПМГ 15-96. Требования к компетентности лабораторий неразрушающего контроля и технической диагностики.

ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. — 18.10.94, Наказ № 104 Держнаглядохоронпраці України.

МИ 207-80. Методика определения развивающихся дефектов акустико-эмиссионным методом. — М.: Изд-во стандартов, 1980.

СТП 50.01-2000. Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Акустико-емісійний метод контролю.

СТП 50.02-2000. Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Загальні технічні вимоги.

СТП 50.03-2000. Технічна діагностика. Вимоги до персоналу та порядок його акредитації.

СТП 50.04-2000. Технічна діагностика. Вимоги до центрів підготовки і атестації персоналу та порядок їх акредитації.

СТП 50.05-2000. Технічна діагностика. Вимоги до лабораторій та порядок їх акредитації.

ДНАОП 0.00-6.05-97. Методика оценки технического состояния безопасности оборудования и трубопроводов, работающих в среде хлора.

РД 001.01-95. Методические указания по оценке технического состояния мостовых, козловых и специальных кранов.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию 20.09.2003

УДК 621.120.14

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЛЕНОЧНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАДИОГРАФИИ (новые национальные стандарты)

Н. Г. БЕЛЫЙ, Н. В. ТРОИЦКАЯ

Развивающиеся интеграционные процессы в мире предопределяют формирование сложной и вместе с тем достаточно надежной инфраструктуры взаимодействия различных государств в научно-производственной сфере. В настоящее время очевидна нецелесообразность автономного, замкнутого в рамках одного государства развития индивидуального потенциала, и поэтому актуален вопрос о выработке единых для разных стран критериев оценки и контроля качества производимой продукции.

Организацией, которая осуществляет рассмотрение и экспертизу нормативно-технической документации, решает вопросы, связанные с разработкой новых нормативно-технических документов в области неразрушающего контроля (НК), гармонизацией их с международными является Технический комитет по стандартизации ТК-78 «Техническая диагностика и неразрушающий кон-

троль» Государственного комитета Украины по вопросам технического регулирования и потребительской политики.

В [1] описано ряд национальных стандартов по радиографическому (РГ) контролю, гармонизированных с европейскими. Так, стандарт ДСТУ EN 462-1 определяет индикаторы качества изображения (ИКИ) проволоочного типа, требования к нему, а также метод определения качества изображения. Стандарт ДСТУ EN 462-2 определяет ИКИ типа ступень/отверстие, требования к нему и метод определения качества изображения. Стандарт ДСТУ EN 462-4 предоставляет инструкции для экспериментального определения показателя качества изображения и таблиц качества изображения. Стандарт ДСТУ EN 462-5 определяет ИКИ двухпроволочного типа, а также метод определения показателя нерезкости изображения. Стан-

дарт ДСТУ EN 12517 устанавливает приемочные критерии допустимости дефектов в стали стыковых сварных швов, обнаруживаемых при выполнении РГ контроля.

Новая серия национальных стандартов по радиографии ДСТУ EN 584 посвящена промышленной РГ пленке.

Первой частью этой серии стандартов является стандарт ДСТУ EN 584-1-2001 «Неразрушающий контроль. — Промышленная радиографическая пленка. — Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии» [2].

Цель настоящего стандарта — установление рабочих характеристик пленочных систем в сочетании со свинцовыми экранами для промышленной радиографии. Настоящий стандарт предназначен для гарантии того, что качество изображения на РГ снимках в случае влияния пленочной системы отвечает требованиям Европейского стандарта EN 444 «Неразрушающий контроль. — Общие требования к радиографическому контролю металлических материалов рентгеновским и гамма-излучением». Настоящий стандарт не применим для классификации пленок, используемых с флуоресцентными усиливающими экранами.

Дополнительные методы оценки фотографияческих процессов, за счет которых могут контролироваться режимы работы пленочных систем, принятые в промышленности, описываются в ДСТУ EN 584-2-2001.

В стандарте ДСТУ EN 584-1-2001 используются следующие термины и определения.

Пленочная система — сочетание пленки и ее обработки, которая выполняется в соответствии с инструкциями производителя пленки и/или производителя химикатов для обработки пленки.

Градиент G — локальная крутизна характеристической кривой для некоторой оптической плотности D . Он является величиной контраста, достигаемого используемой пленочной системой.

Гранулярность σ_D — флуктуации оптической плотности на РГ снимке, которые накладываются на изображение объекта.

СЕН чувствительность S — обратная величина дозы излучения K_S , измеренная в греях, которая соответствует определенной оптической плотности D обработанной пленки:

$$S = 1/K_S. \quad (1)$$

Класс пленочной системы — классификация, учитывающая предельные величины, указанные в табл. 1.

Отношение градиент-шум — отношение градиента G к гранулярности σ_D . Оно прямо связано с отношением сигнал-шум.

Все другие параметры, определяющие сигнал, такие, как частотно-контрастная характеристика или энергия излучения, считаются постоянными.

Для определения требований к продукции важно, чтобы показатели оцениваемых образцов достигали средних значений, получаемых пользователем. Это потребует периодических испытаний нескольких различных партий на соответствие на-

Таблица 1. Предельные значения градиента, отношения градиент-шум и гранулярности

Класс пленки	Минимальный градиент $G_{\min}$ при		Минимальное отношение градиент-шум $(G/\sigma_D)_{\min}$	Максимальная гранулярность $\sigma_{D\max}$
	$D = 2$ без D_0	$D = 4$ без D_0		
C1	4,5	7,5	300	0,018
C2	4,3	7,4	270	0,018
C3	4,1	6,8	180	0,023
C4	4,1	6,8	150	0,028
C5	3,8	6,4	120	0,032
C6	3,5	5,0	100	0,039

стоящему стандарту. Перед испытаниями образцы должны храниться в течение определенного времени в соответствии с рекомендациями изготовителя, чтобы имитировать среднее старение, которое обычно происходит при использовании продукции. Основная цель описанного выше отбора и хранения образцов состоит в том, чтобы гарантировать, что свойства пленки соответствуют свойствам пленок, получаемым пользователем при их использовании.

Образцы пленки должны подвергаться воздействию рентгеновских лучей трубки с вольфрамовой мишенью. Собственная фильтрация трубки и дополнительный медный фильтр, размещаемый как можно ближе к мишени, должны обеспечивать фильтрацию, которая эквивалентна меди толщиной $(8 \pm 0,05)$ мм. Потенциал трубки должен задаваться таким образом, чтобы слой половинного ослабления соответствовал меди толщиной $(3,5 \pm 0,2)$ мм. Напряжение на трубке около 220 кВ обычно удовлетворяет этому требованию.

Пленочная система должна включать передний и задний экран из свинцовой фольги толщиной от 0,02 до 0,04 мм. Для однослойных пленок эмульсия должна располагаться со стороны трубки. Должен обеспечиваться хороший контакт пленка-фольга.

Градиент G определяется отношением D к $\log_{10} K$; величина G рассчитывается из наклона dD/dK кривой зависимости D от K при оптической плотности $(D - D_0)$, т. е.

$$G = \frac{dD}{d \log_{10} K} = \frac{K}{d \log_{10} e} \frac{dD}{dK}, \quad (2)$$

где K — доза, соответствующая значениям оптических плотностей $(D - D_0)$, в греях; D_0 — оптическая плотность неэкспонированной обработанной пленки, включая подложку (оптическая плотность вуали и подложки).

Кривая зависимости D к K аппроксимируется полиномом третьего порядка. Для того чтобы получить характеристическую кривую, экспонируется серия из не менее 12 РГ снимков в равномерно распределенном интервале оптической плотности от 1,0 до 5,0.

Таблица 2. Определение CEN чувствительности S по дозе K_S для оптической плотности $D = 2$ после вычитания D_0

$\log_{10} K_S$		CEN чувствительность S
от	до	
-3,05	-2,96	1000
-2,95	-2,86	800
-2,85	-2,76	640
-2,75	-2,66	500
-2,65	-2,56	400
-2,55	-2,46	320
-2,45	-2,36	250
-2,35	-2,26	200
-2,25	-2,16	160
-2,15	-2,06	125
-2,05	-1,96	100
-1,95	-1,86	80
-1,85	-1,76	64
-1,75	-1,66	50
-1,65	-1,56	40
-1,55	-1,46	32
-1,45	-1,36	25
-1,35	-1,26	20
-1,25	-1,16	16
-1,15	-1,06	12
-1,05	-0,96	10
-0,95	-0,86	8
-0,85	-0,76	6
-0,75	-0,66	5
-0,65	-0,56	4

Градиент G должен измеряться с максимальной погрешностью $\pm 5\%$ при доверительной вероятности 95 %.

Гранулярность определяется путем линейного сканирования пленки постоянной оптической плотностью с помощью микроденситометра. Оба эмульсионных слоя должны регистрироваться — это значит, что глубина резкости микроденситометра должна включать оба слоя. Отраженная оптическая плотность должна пересчитываться в диффузную оптическую плотность после калибровки. Стандартное отклонение σ_D является мерой гранулярности пленки.

Оптическая плотность пленки должна составлять $D = 2,00 \pm 0,05$ после вычитания плотности вуали и подложки.

Длина сканирования на рентгеновской пленке должна составлять по крайней мере 100 мм, диаметр диафрагмы микроденситометра — (100 ± 5) мкм.

Для того чтобы ограничить низкочастотный шум, принятый микроденситометром, данные должны фильтроваться с помощью фильтра высоких частот с пространственной частотой 0,1 пар линий на миллиметр.

Определение гранулярности должно осуществляться с максимальной погрешностью $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 95 %. Должно про-

водиться не менее шести измерений на различных образцах.

CEN чувствительность S определяется при оптической плотности $D = 2$ за вычетом плотности вуали и подложки D_0 по табл. 2.

Классы пленочных систем устанавливаются по предельным значениям указанных выше величин.

Для того чтобы пленочная система была отнесена к соответствующему классу, пленка должна отвечать всем предельным значениям градиента, гранулярности и отношения градиент/шум по табл. 1. Классификация действительна только для пленочных систем, имеющих переднюю и заднюю фольгу.

Пленка должна поставляться с соответствующим сертификатом, требования к которому содержатся в данном стандарте.

Второй частью серии стандартов ДСТУ EN 584 является стандарт ДСТУ EN 584-2/2001 «Не разрушающий контроль. Промышленная радиографическая пленка. Часть 2: Контроль обработки пленки с помощью опорных величин» [3].

Настоящий стандарт устанавливает порядок проведения контроля систем обработки пленки.

В этом стандарте используются следующие определения.

Пленочная система — сочетание пленки и ее обработки, которая выполняется в соответствии с инструкциями производителя пленки и/или производителя химикатов для обработки пленки.

Класс пленочной системы — классификация пленки с учетом предельных значений, указанных в табл. 1.

Оптический клин — часть пленочного материала, на которой может быть экспонирован ступенчатый клин.

Предварительно экспонированный оптический клин — полоса пленки, которая предварительно экспонирована таким образом, что после ее обработки пользователем проявляется не менее десяти участков с различной оптической плотностью.

Чистая оптическая плотность — оптическая плотность пленки без учета плотности вуали и подложки.

Оптические клинья должны иметь минимальную экспонированную поверхность 15×100 мм. Предварительно экспонированный оптический клин имеет различные поля: ступенчатый клин для измерения оптической плотности и неэкспонированное поле для измерения оптической плотности подложки и испытания на длительность хранения.

Выбранная пленка для изготовления оптического клина должна при обработке давать такое же качество изображения, как и пленки, классифицированные по стандарту ДСТУ EN 584-1.

Рассмотрим пример изготовления предварительно экспонированного оптического клина. На рис. 1 показано расположение при съемке. Вид ступенчатого клина показан на рис. 2, толщина ступеней приведена в табл. 3. Для изготовления оптического клина могут использоваться другие материалы, если они обеспечивают такие же степени плотности.

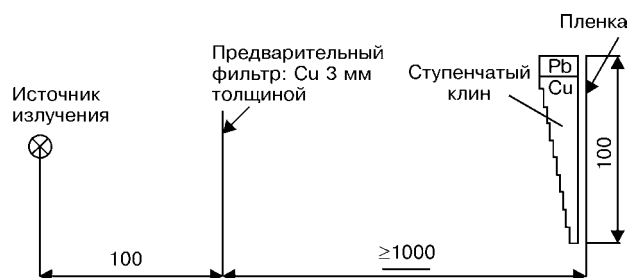


Рис. 1. Схематическое изображение радиографирования ступенчатого клина

Последовательные ступени оптического клина должны экспонироваться таким образом, чтобы после обработки пленки сохранялось увеличение плотности около 0,3 на ступень, например, ступенчатый клин в соответствии с табл. 3 и рис. 2.

Должны приниматься меры по предотвращению рассеянного излучения. В качестве источника излучения служит рентгеновская установка постоянного напряжения, которая работает при напряжении около 150 кВ. Время экспозиции выбирается таким образом, чтобы после обработки на пленках, соответствующих ГОСТу EN 584-1, на первых шести ступенях оптического клина (считая от более низкой плотности в направлении более высокой плотности) достигалась чистая оптическая плотность приблизительно 2,0.

Ступени для определения опорных величин должны соответствовать рис. 3: ступень X — ступень с чистой оптической плотностью, наиболее близкой к $D = 2,0$; ступень $X + 4$ — ступень с максимальной оптической плотностью, удаленная от ступени X на четыре ступени.

Для определения опорных величин должны обрабатываться, по крайней мере, пять предварительно экспонированных пленок одного класса. Определенные затем значения оптической плотности должны иметь максимальное отклонение $\Delta D = \pm 0,1$.

Величины опорного коэффициента чувствительности S_r и опорного коэффициента C_r определяются следующим образом.

В первом случае рассчитывается среднее значение величины чистой оптической плотности ступени X . Опорный коэффициент чувствительности соответствует этому среднему значению, которое округляется до десятичного значения. Во втором рассчитывается среднее значение величины чистой оптической плотности ступени $X + 4$. Опорный коэффициент контраста равен разности среднего значения оптической плотности ступени X и зна-

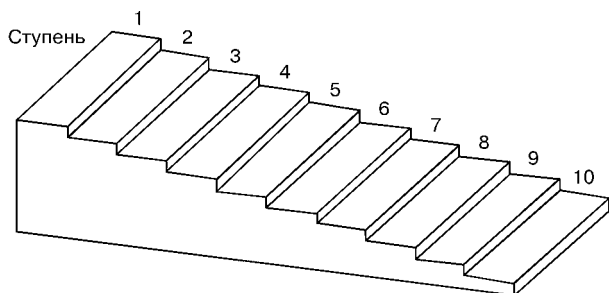


Рис. 2. Ступенчатый клин

Таблица 3. Толщина ступеней (материал: мелкозернистая медь)

Номер ступени	Толщина при 150 кВ, мм
1	11,7
2	10,8
3	10,0
4	9,3
5	8,8
6	8,2
7	7,7
8	7,3
9	6,9
10	6,5

чения оптической плотности ступени $X + 4$ и округляется до десятичного значения.

Предварительно экспонированные оптические клинья должны всегда поставляться с сертификатом, содержащим следующие данные: описание системы обработки пленки, которая включает сведения о проявочной машине, применяемых химикатах, времени обработки и температуре; наименование изготовителя и тип предварительно засвеченного оптического клина; опорный коэффициент чувствительности, опорный коэффициент контраста и номера ступеней для вычисления соответствующих коэффициентов.

Следующие данные должны указываться в сертификате:

обработка: ручная или машинная; проявитель, тип, время, температура; закрепитель, тип, время, температура; оптический клин; наименование изготовителя; тип; коэффициент чувствительности: опорный коэффициент чувствительности (S_r); опорная ступень чувствительности (X); коэффициент контраста: опорный коэффициент контраста (C_r); опорная ступень контраста ($X + 4$).

Предварительно экспонированные оптические клинья должны храниться в холодном и сухом месте. Изготовитель должен предоставить данные о сроке годности и условиях хранения.

Для подтверждения соответствия пленочной системы определенному классу предварительно экспонированные оптические клинья и тип пленки, входящей в пленочную систему, должны быть изготовлены одним производителем.

Если опорные значения не могут быть получены в момент включения системы обработки, то

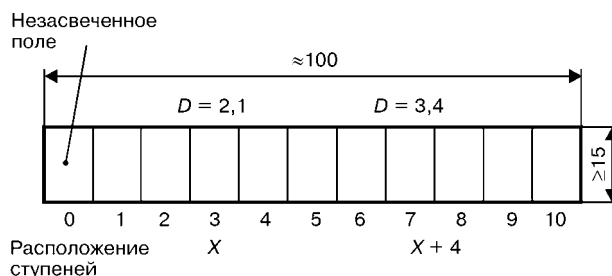


Рис. 3. Пример оптического клина (положение и оптическая плотность ступеней X и $X + 4$ на оптическом клине могут изменяться)

температура проявителя должна устанавливаться в пределах ± 2 К по сравнению с температурой, определенной в сертификате предварительно экспонированного оптического клина.

Проявочная машина должна настраиваться и технически обслуживаться в соответствии с рекомендациями изготовителя. Для того чтобы избежать больших изменений в качестве обработки пленки при запуске машины, перед проявлением предварительно экспонированного оптического клина следует соблюсти рекомендации производителя по процедуре запуска.

Химикаты для обработки должны готовиться, освежаться и их температура должна поддерживаться в соответствии с точно установленным классом пленочной системы и рекомендациями производителя пленки.

Для того чтобы обеспечить оптимальную протяжку через проявочную машину, должны соблюдаться рекомендации изготовителя по обработке и протяжке пленок малого формата.

Для измерения оптической плотности должен применяться денситометр с минимальным диапазоном оптической плотности D от 0 до 4. Денситометр должен калиброваться по эталонному оптическому клину. Прибор считается калиброванным, если отклонение измеренных значений от значений эталонного оптического клина находится в пределах $\pm 0,1$.

Коэффициент контрастности C_x для оценки системы определяется как разность между оптической плотностью D_{x+4} ступени $X + 4$ и оптической плотностью D_x ступени X , отнесенная к опорному коэффициенту чувствительности S_r для исключения влияния чувствительности:

$$C_x = (D_{x+4} - D_x) \frac{S_r}{S_x}, \quad (3)$$

где D_0 — оптическая плотность ступени 0; D_x — оптическая плотность ступени X ; S_r — опорный коэффициент чувствительности; S_x — коэффициент чувствительности $(D_x - D_0)$.

Достигнутое качество обработанной пленки частично зависит от остатков гипосульфата в эмульсионном слое пленки вследствие недостаточной фиксации или промывки.

Для определения достаточности фиксации и промывки должна проводиться следующая проверка: 10 г нитрата серебра и 30 г уксусной кислоты растворяют в литре дистиллированной воды. Капля этого испытательного раствора наносится на неэкспонированную часть обработанной

пленки. Через две минуты избыточная жидкость удаляется. Этот процесс повторяется в противоположном месте с обратной стороны пленки. Полученная окраска сравнивается с поставленной изготовителем таблицей.

После обработки оптического клина рассчитываются параметры системы обработки. Эти результаты должны сравниваться с опорными значениями. Система обработки пленки соответствует стандарту, если выполняются следующие условия: $D_0 < 0,3$.

Полученный коэффициент чувствительности не должен отличаться от опорного коэффициента чувствительности S_r более чем на ± 10 %.

Коэффициент контраста не должен отличаться от опорного коэффициента контраста C_r более чем на -10 % или $+15$ %.

Обработка должна проверяться после новой подготовки проявляющего раствора. Дополнительно рекомендуется проводить регулярный контроль.

Если условия окружающей среды значительно изменяются или если освежение химикатов производится вручную, контроль должен проводиться чаще.

Протокол испытаний должен содержать следующие данные: дату проверки; метод обработки: ручной или автоматический; установочные параметры: температуру проявителя и время обработки; наименование изготовителя и обозначение применяемых химикатов; наименование изготовителя, обозначение и идентификация сертифицированных оптических клиньев; оптическая плотность подложки и вуали D_0 ; коэффициент чувствительности S_x и опорный коэффициент чувствительности S_r ; коэффициент контраста C_x и опорный коэффициент контраста C_r .

Документируются результаты испытаний в письменном виде, в виде диаграммы или компьютерной программы.

Стандарты ДСТУ EN 584 утверждены приказом Госстандарта Украины № 658 от 28.12.01 г. и введены в действие с 1.01.2003 г.

1. Белый Н. Г., Троицкая Н. В. О новых национальных стандартах по радиграфическому контролю. — Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 1. — С. 47–52.
2. ДСТУ EN 584-1-2001. Неразрушающий контроль. Промышленная радиографическая пленка. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии.
3. ДСТУ EN 584-2-2001. Неразрушающий контроль. Промышленная радиографическая пленка. Часть 2. Контроль обработки пленки с помощью опорных величин.



АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ — 85 років



Офіційною датою створення Академії прийнято рахувати 27 листопада 1918 р. — день проведення Установчих зборів Української Академії наук. З того часу Академія пройшла складний шлях свого розвитку, що був обумовлений характером неоднозначних процесів, які проходили в суспільстві і державі. Але, не дивлячись на це, науковий пошук вчених

Академії ніколи не переривався. За 85 років свого існування Академія зробила значний внесок в розвиток української науки та вирішення науково-технічних, соціально-економічних і культурно-просвітницьких проблем України. Немало винаходів, здійснених в інститутах Академії, мають світове значення.

Організаційна структура, форми і методи діяльності Академії наук України обумовлені її правовим статусом, що має два рівні регулювання — державний (законами, постановами уряду тощо) і внутріш-

ньоакадемічний (Уставом Академії, Постановами Президії Академії тощо).

Першими актами, що визначали правовий статус Академії, були Статут і Декрет гетьмана П. П. Скоропадського від 14 листопада 1918 р. «Про установи Української Академії наук». У відповідності з цим статутом Українська Академія наук розглядалась в якості вищого державного наукового закладу України.

Сучасний етап діяльності Академії наук України почався з прийняття Декларації про державний суверенітет України та Акту проголошення незалежності України. В цей період Академія наук України вийшла з системи Академії наук СРСР і зконцентрувала свою увагу на служінні незалежній Україні. Це обумовило необхідність внесення змін в правовий статус Академії. У відповідності з ними Академія наук являється вищим науковим закладом України з правом самоврегулювання. Цими ж актами урегульовано питання нової структури Академії, розширено права інститутів та інших науково-дослідних закладів, що входять до її складу, демократизовано процес управління Академією, визначено правовий режим.

Вчені Академії наук України, долаючи кризові явища, продовжують невтомно працювати, поглиблювати творчий пошук на благо України для прогресу вітчизняної і світової науки.



МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР «АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕСУРС»

29 сентября — 4 октября 2003 г. в г. Будапеште состоялась *школа-семинар по проблеме обеспечения безопасности эксплуатации конструкций с помощью новой технологии на базе эффекта акустической эмиссии*. Инициаторами мероприятия выступили Венгерский университет св. Иштвана, г. Будапешт, Технический комитет Украины по стандартизации № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», Киев, Украина, TUV (Восточно-европейское отделение), АО Видеотон (Венгрия).

В работе школы-семинара приняли участие представители Венгрии, России, Украины, всего 29 человек: из них четыре доктора технических наук, два кандидата технических наук.

Работу школы-семинара открыл заместитель декана Университета св. Иштвана д-р техн. наук Каифас Ф., который отметил большое народно-хозяйственное значение развития новых интеллектуальных технологий в области обеспечения безопасности кон-

струкций и сооружений, пожелал успешной работы школе и приятного отдыха.

Директор школы-семинара Элек И. отметил, что *целью работы школы-семинара является обсуждение последних достижений науки и основанной на ней технологии в области оценок состояния конструкций и оборудования, находящегося в эксплуатации*. Осветил также все организационные вопросы работы школы-семинара. Он также отметил, что не очень широкий спектр стран-участниц объясняется громадными успехами в вопросе применения этой новой технологии, что порождает конкуренцию, так как она значительно снижает себестоимость продукции. В некоторых случаях даже не называются предприятия, на которых введены в действие новые контрольные технологии, поэтому часть приглашенных лекторов не приняли участие в работе школы-семинара.

Настоящая школа ориентирована содержанием и объемом лекционного материала на руководящий сос-



тав промышленных предприятий. Мы считаем, что руководящее звено предприятий в большей степени определяет техническую политику предприятий и должно иметь достаточно ясное представление о новых высоких (интеллектуальных) технологиях.

На школе-семинаре были заслушаны циклы лекций по следующим направлениям:

Акустико-эмиссионная диагностика сварных конструкций (д-р техн. наук, проф. Недосека А.);

Акустико-эмиссионная аппаратура, построение, принципы работы (Гербе Я.);

Программное обеспечение акустико-эмиссионных систем (Табори Й.);

Диагностика промышленных конструкций, датчики акустической эмиссии, стандарты (Яременко М.);

Система ЕМА-3, программное обеспечение, основы работы, испытание образцов (канд. техн. наук, старший научный сотрудник (Недосека С.).

Обсуждение изложенного материала состоялось за круглым столом. С большим вниманием были заслу-

шаны сообщения представителей предприятий, успешно использующих и расширяющих применение на своих предприятиях этой технологии.

Отмечено как положительное применение высокоинтеллектуальных составляющих технологий, включающих обоснование принимаемых решений и программного обеспечения, построенных на самых последних достижениях в области теории принятия решений и вычислительной техники.

На семинаре была продемонстрирована в действии аппаратура ЕМА-3У, функционирующая на базе указанных выше интеллектуальных технологий.

Участники школы-семинара приняли решение о необходимости дальнейшего проведения такой формы семинаров-школ по мере накопления фактического материала.

По окончании школы-семинара каждому участнику были вручены сертификаты международного класса.

*Информационное сообщение подготовила
д-р техн. наук, проф. Швец Т. М.*

ДЕФЕКТОСКОПИЯ 2003

9–12 сентября
Санкт-Петербург, Россия, Михайловский манеж

IV Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля

«ДЕФЕКТОСКОПИЯ–2003» — это выставка крупнейших мировых производителей и поставщиков приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля и технической диагностики. Практически каждый ее участник — это лидер в своей области!

Ежегодно более 70 фирм из России, стран ближнего и дальнего зарубежья принимают участие в выставке, организуемой Выставочным объединением «РЕСТЭК» под эгидой Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике, Европейской федерации по неразрушающему контролю, Международного комитета по неразрушающему контролю при поддержке Министерства путей сообщений РФ и Минатома России.

Выставка «ДЕФЕКТОСКОПИЯ–2003» организована с целью представления специалистам всех отраслей промышленности, строительства и транспорта приборов и средств неразрушающего контроля и диагностики, ознакомления с мировыми новинками в области средств контроля, производства приборов, оборудования и расходных материалов.

На протяжении четырех лет выставка привлекает внимание экспонентов и посетителей не только обилием информации, но и насыщенностью и актуальностью научной и деловой программы. В рамках «ДЕФЕКТОСКОПИИ–2003» были проведены восемь «круглых столов», в работе которых приняли участие

более 300 российских и зарубежных специалистов. Обсуждались актуальные вопросы: **НК в строительстве и в атомной промышленности, рентгенотелевизионные комплексы, объективизация результатов УЗК, возможности автоматизированного УЗК и метода магнитной памяти металла и др.** Вызавшие наибольший интерес сообщения будут опубликованы в журнале «В мире НК», который во время проведения выставки отметил свое пятилетие.



Открытие выставки



Спонсором научной программы выступил постоянный участник выставок — Компания Нординкрафт (Череповец).

Наглядная демонстрация действующего оборудования, новых разработок и технологий, востребованных на практике, внедрение новых форм и методов работы с посетителями, возможность прямых контактов между производителем и потребителем, высокий профессиональный уровень посетителей являются визитной карточкой выставки «ДЕФЕКТОСКОПИЯ-2003».

За четыре дня работы выставки ее посетили более 3500 специалистов из 11 стран (Англии, Беларуси, Болгарии, Германии, Израиля, Латвии, Литвы, Молдовы, США, Украины, Финляндии, Чехии, Эстонии) и более чем из 160 городов России, представляющих все важнейшие отрасли промышленности:

Автомобильная промышленность	4,88 %
Аэрокосмическая промышленность	7,72 %
Дорожное строительство и эксплуатация дорог	3,25 %
Коммунальное хозяйство	4,47 %
Машиностроение	23,17 %
Металлургия	16,26 %
Нефтегазовая промышленность	19,11 %
Обслуживание железнодорожного транспорта	8,94 %
Строительство	12,60 %
Судостроение	8,13 %
Транспорт	7,32 %
Энергетика	24,39 %
Иное	38 %

Высок был и должностной статус посетителей выставки: 48 % — это представители высшего руководящего состава и ведущие специалисты предприятий, 48 % — инженерно-технический персонал. По методам контроля интересы посетителей распределились следующим образом:

Ультразвуковой контроль	76,02 %
Радиационный контроль	32,11 %
Магнитопорошковый контроль	29,67 %
Капиллярная дефектоскопия	26,42 %
Электромагнитный контроль	26,02 %
Акустическая эмиссия	22,76 %
Контроль трубопроводов	20,73 %
Визуальный/оптический контроль	19,51 %
Вибрационный контроль	18,70 %
Инфракрасный/термический контроль	16,26 %
Радиоволновый контроль	15,04 %
Течеискание	14,63 %
Динамический контроль	13,01 %
Услуги	11,79 %
Не указано	1,22 %



Журналу «В мире неразрушающего контроля» — 5 лет!

Выставка «ДЕФЕКТОСКОПИЯ-2003» стала еще одним свидетельством позитивных перемен в российской экономике. В этом году она собрала рекордное за свою историю число экспонентов, продемонстрировавших продукцию более 100 производителей из Бельгии, Великобритании, Германии, Дании, Израиля, Молдовы, США, Украины, Франции, Чехии, Швейцарии, Швеции, Японии.

Следует отметить постоянных участников всех выставок в Петербурге: AGFA-Gevaert N. V. (Бельгия), АКС (Ассоциация «СпектрГрупп», Москва), Алтек (СПб), Алтес (Москва), АСК-Рентген (Зайферт, Зайферт-Рентген, СПбГермания), Бэлфи (СПб), Галекс (СПб), Интроскоп (Кишинев, Молдова), Луч (Москва), Нординкрафт (Череповец), Олимпас Москва, Радиоавионика (СПб), РДМ (Кишинев, Молдова), С-Инструментс (Москва), Синтез (СПб), Спектрофлэш (СПб), Твема (Москва), Foma Bohemia (Чехия), Helling GmbH (Германия), Sherwin (США). Впервые приняли участие в выставке Aerospace Testing (Великобритания), BAVB Co. (Франция), Виматек (СПб), Завод фотохимреактивов (Казань), Kodak (Великобритания), МЕТ (Менделеево), Нижегородский завод им. Фрунзе, Ниеншанц (СПб), Промприбор (Киев, Украина), Silverwing (Великобритания), ScanMaster Systems Ltd (Израиль), Стройприбор (Челябинск), ТСТ (СПб), FORCE Technology (Дания).

Следующая пятая выставка «ДЕФЕКТОСКОПИЯ-2004» состоится в Санкт-Петербурге 14–16 сентября 2004 г. Этот скромный юбилей организаторы планируют отметить вручением призов постоянным участникам выставки, проведением как конкурсов среди экспонентов по разным номинациям, так и профессиональных конкурсов среди посетителей. Значительно будет расширена научная и культурная программа выставки.

Россия, 197110,
Санкт-Петербург,
ул. Петрозаводская, 12
Тел.: (812) 320-63-63
Факс: (812) 320-80-90
E-mail: main@restec.ru



РЕСТЭК
ВЫСТАВОЧНОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ



УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ КОРОЗІОНІСТІВ

ДОНБАСЬКА СЕКЦІЯ УКРАЇНСЬКОЇ АСОЦІАЦІЇ КОРОЗІОНІСТІВ

МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ-ВИСТАВКА «ЗАХИСТ ВІД КОРОЗІЇ І МОНІТОРИНГ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ, СПОРУД ТА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ»

9-12 червня 2003 р., м. Донецьк

Відбулася Міжнародна науково-практична конференція-виставка «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж», організаторами якої виступили Держбуд України, Донецька облдержадміністрація, Українська асоціація корозіоністів, Українська асоціація з металевих конструкцій. Проведенню конференції сприяла плідна організаційна робота, пов'язана з реалізацією Доручення Президента України від 17 квітня 2002 р. № 1 — 1/509 і Доручення Кабінету Міністрів від 9 вересня 2002 р. № 4378/2 щодо формування Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки. Комплексний характер проблеми та необхідність здійснення системних заходів щодо запобігання корозійного руйнування будівельних конструкцій об'єктів різного призначення об'єднали зусилля науково-технічних робітників і фахівців ведучих наукових центрів України, серед яких фахівці Національної академії наук України, Міністерства освіти і науки України, Міністерства палива та енергетики України, Державного комітету України з нагляду за охороною праці, Держбуду Росії, Академії будівництва України, Російського НТС будівельників, Корпорації «Укрбуд», Донецького та Західного наукових центрів НАН України, Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАНУ, ВАТ УкрНДІПСК ім. В. М. Шимановського, Донбаської державної академії будівництва і архітектури, Донецького ПромбудНДІПроекту, Благодійного фонду «Наука і освіта — для прогресу будівництва».

Проблема підвищення довговічності конструкцій розглядалася в 70-90-х роках на VI Всесоюзній науково-технічній конференції «Захист металевих та залізобетонних будівельних конструкцій від корозії» (4-6 вересня 1978 р.) та VIII Всесоюзній науково-практичній конференції «Корозія та захист будівельних конструкцій виробничих будівель та споруд» (15-17 травня 1990 р.), які проводилися в м. Донецьку на базі Донецького ПромбудНДІПроекту та Донбаської державної академії будівництва і архітектури. Це визначило широкий інтерес до теоретичних та практичних питань конференції «Донбас-Ресурс-2003», розглянутих на

трьох пленарних та чотирьох секційних засіданнях з таких напрямків:

- *теоретичні та експериментальні дослідження в галузі корозії та захисту залізобетонних і металевих конструкцій;*
- *розвиток і удосконалення нормативної бази для забезпечення безаварійної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж;*
- *оцінка технічного стану, визначення післяремонтної міцності та підвищення несучої спроможності металевих і залізобетонних конструкцій;*
- *продовження залишкового ресурсу на підставі діагностики і моніторингу експлуатаційного стану напружених конструкцій.*

Церемонія урочистого відкриття конференції відбулася вранці 10 червня 2003 р. Конференцію відкрив Президент Української асоціації з металевих конструкцій **Євген Горохов**. Директор Донецького ПромбудНДІПроекту **Олександр Сердюк** відмітив високий кваліфікаційний рівень учасників конференції, серед яких фахівці з 26 міст України, Польщі, Росії, Чехії, що представляють 22 науково-дослідницьких і проектних інститутів, 17 вищих навчальних закладів, 19 спеціалізованих організацій і 25 промислових підприємств. З вітальним словом до учасників конференції-виставки звернувся міський голова **Олександр Лук'янченко**, який підкреслив важливу роль наукових та проектних організацій при забезпеченні поновлення основних фондів Донбасу на основі сучасних матеріалів і технологій.

Підтримку зусиллям вчених і фахівців висловив начальник Головного управління промисловості, енергетики, транспорту та зв'язку **Володимир Жуков**, який зачитав звернення Голови Донецької облдержадміністрації **Анатолія Близнюка**. Стратегічне розташування Донбасу в економічному потенціалі основних галузей промисловості України визначає значимість проблеми забезпечення збереження основних фондів будівель, споруд та інженерних мереж, необхідність ефективного і сучасного реагування на ліквідацію причин, що викликають передчасний знос конструкцій. Тому основною задачею роботи конфе-



ренції необхідно вважати розробку системи засобів, направлених на забезпечення технологічної безпеки, запобігання причин виникнення аварій і надзвичайних ситуацій техногенного характеру в регіоні.

Значний інтерес учасників конференції викликала доповідь **Леоніда Лобанова** «Про концепцію створення системи технологічної безпеки для основних галузей економіки України» (Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, м. Київ). Детальна характеристика стану досліджень в галузі корозії та протикорозійного захисту прозвучала в доповіді, з якою виступив Президент Української асоціації корозіоністів **Василь Похмурський** (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка, м. Львів).

Конструктивному обговоренню проблем на конференції сприяли пленарні доповіді провідних фахівців:

Степанової В. Ф. Теоретические основы и практический подход к вопросам обеспечения долговечности железобетонных конструкций от коррозии (ГУП НИИЖБ, г. Москва);

Гордеева В. Н. Научные и организационные аспекты проблемы безопасности эксплуатации зданий, сооружений и конструкций (УкрНИИПСК, г. Киев);

Кривошеєва П. І. Проблеми підтримки ресурсу будівельних об'єктів та забезпечення їх експлуатаційної надійності (ДНДІБК, м. Київ);

Алипова А. Н. Коррозионное состояние объектов жилищно-коммунального хозяйства и опыт использования современных противокоррозионных материалов в Донецкой области (Донецкгосадминистрация, г. Донецк);

Яковлева В. В. Коррозия портландцементного бетона в растворах различных сульфатных солей (УГНТУ, г. Уфа);

Чернышева Ю. П. Шлакопортландцемент и проблемы долговечности железобетонных конструкций (ПСНИИП, г. Донецк);

Шейніча Л. О. Органосилікатні композиції для протикорозійного захисту та ремонтновідновлювальних робіт (ДНДІБК, м. Київ);

Шимановського А. В., Харченко Р. Б. Техническое состояние лицевой гермооблицовки защитных оболочек реакторов ВВЭР-1000 (УкрНИИПСК, г. Киев);

Осадчука В. А., Кушніра Р. М., Марчука М. В. Оцінка залишкової міцності трубопроводів після появи поверхневих дефектів (ІППММ, НУ «ЛП», м. Львів);

Королева В. П. Нормативная оценка агрессивных воздействий в расчетах стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность (ДонГАСА, г. Макеевка);

Лантух-Лященко А. И. Модель деградации элементов транспортных сооружений (НТУ, м. Киев).

Матеріали і технології, що представлені на виставці фірмами, серед яких ВАТ «Ділове співробітництво», «Львівантикор», ТОВ «ЕЛІЗ», ВАТ Торговельний будинок «Радуга», ТОВ «Агросинтез», НВО «Інкор» та ін., підтверджують можливості тривалого захисту

залізобетонних і металевих конструкцій на основі сучасних технологій і обладнання для підготовки поверхні та нанесення захисних покриттів.

В межах програми роботи конференції відбулося спільне засідання науково-координаційної та експертної Ради з питань ресурсу та безпеки експлуатації конструкцій, будівель та машин, Міжвідомчої Ради з проблем корозії та протикорозійного захисту металів при Президії Національної академії наук України, Донецького та Західного наукових центрів НАН України. Тематику для обговорення учасників круглого стола були питання:

- *про регіональну концепцію забезпечення технологічної безпеки;*

- *взаємодія наукових організацій і фахівців Донецького та Західного наукових центрів при розробці заходів технологічної безпеки;*

- *про допоміжні заходи при експлуатації в корозійних середовищах на об'єктах підвищеної небезпеки;*

- *розробка вимог щодо декларації безпеки об'єктів підвищеної небезпеки в сильноагресивних середовищах;*

- *створення системи корозійного моніторингу та технічної діагностики на промислових об'єктах підвищеної небезпеки;*

- *про удосконалення системи нормативно-технічних вимог підвищення довговічності конструкцій будівель та споруд.*

РІШЕННЯ

За результатами роботи Міжнародної науково-практичної конференції-виставки «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж» прийнято відповідне рішення, в якому висвітлені наступні пропозиції.

1. Звернути увагу міністерств, центральних органів виконавчої влади на необхідність розробки галузевих та регіональних програм, здійснення заходів по забезпеченню надійності і безпечної експлуатації споруд, конструкцій, обладнання та інженерних мереж з метою забезпечення технологічної та експлуатаційної безпеки промислових виробництв та цивільних об'єктів. Враховуючи необхідність виконання вимог Директиви Ради Європейських співтовариств 89/106/ЕЕС, просити передбачати в межах реальних можливостей кошти, необхідні для розроблення і виконання науковотехнічної, галузевих та регіональних складових Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки.

2. Вважати першочерговими заходами для розв'язання проблем стандартизації з питань захисту від корозії, визначення складу та структури нормативних вимог щодо забезпечення безпеки або встановлених показників якості будівельних матеріалів, виробів і конструкцій відповідно до положень **ДСТУ ISO серії 9000**.

3. Враховуючи стан та завдання розробки сучасної нормативно-методичної бази з захисту від корозії



будівельних матеріалів, виробів і конструкцій, вважати за доцільне створення технічного комітету (ТК) стандартизації «Протикорозійний захист у будівництві» відповідно до вимог «Типового положення про технічний комітет стандартизації». Просити Держбуд України зобов'язати управління науково-технічної політики в будівництві протягом 2003 р. разом з базовими організаціями по нормуванню та стандартизації з питань захисту від корозії підготувати в установленому порядку пропозиції щодо галузевої програми протикорозійного захисту будівельних матеріалів, виробів і конструкцій у корозійних середовищах за наступними напрямками:

зниження ступеню агресивності впливів природних та виробничих середовищ за рахунок засобів екологічного захисту;

визначення вимог безпеки до матеріалів та конструкцій при виборі варіантів первинного та вторинного захисту від корозії для заданої програми обслуговування об'єктів з різним ступенем відповідальності;

підвищення рівня первинного захисту бетонних і залізобетонних конструкцій;

впровадження ефективних засобів та методів протикорозійного захисту з гарантованими показниками довговічності;

інформаційне забезпечення з раціонального вибору матеріалів, конструювання, виготовлення, експлуатації і ремонтного відновлення.

4. Рекомендувати інститутам НДІБК, ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського», КиївЗНДІЕП, Донецькому ПромбудНДІпроекту, Харківському ПромбудНДІпроекту та науковим підрозділам закладів вищої освіти забезпечити розробку:

нормативно-технічних вимог до контролю корозійного стану будівельних матеріалів, виробів і конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки;

методик визначення ризиків з урахуванням ефективності засобів протикорозійного захисту;

кваліфікаційних та атестаційних характеристик експертів з питань діагностики залишкового ресурсу у корозійних середовищах.

5. Підтримати пропозиції Донецького ПромбудНДІпроекта щодо переробки разом з НДІЗБ Держбуду РФ СНиП 2.03.11–85 — «Защита строительных конструкций от коррозии» — в частині розширення вимог

первинного захисту та критеріїв використання для вторинного нових матеріалів.

Просити Держбуд України узгодити цю роботу з Держбудом Російської Федерації.

6. Підтримати пропозицію ВАТ УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського щодо розроблення нормативних документів за власні кошти в рамках виконання ним функцій базової організації:

протягом 2003 року завершити роботи над «Посібником з діагностики та моніторингу корозійного стану будівельних металоконструкцій, будівель та споруд в агресивних середовищах (до СНиП 2.03.11-85)» і в установленому порядку винести їх на затвердження до Держбуду України;

7. Вважати за необхідне розробку принципів технічної політики в галузі забезпечення надійності та довговічності металофонду і визначення структури нормативних документів щодо протикорозійного захисту та продовження залишкового ресурсу конструкцій та технологічного обладнання, будівель та споруд в агресивних середовищах. При розробці та науковому супроводженні Державної програми забезпечення технологічної безпеки основних галузей економіки України потребує впровадження нормативно-правової бази страхового захисту промислових об'єктів для залучення позабюджетних коштів при діагностиці і моніторингу технічного стану обладнання, споруд, машин і механізмів.

8. Звернутися до Міжвідомчої науково-технічної ради з проблем корозії і протикорозійного захисту металів (академік НАН України І. К. Походня, член-кореспондент НАН України В. І. Похмурський) підготувати пропозиції для Кабінету Міністрів України щодо організації контролю за заходами з протикорозійного захисту і врахуванню корозійних втрат в промисловості, транспорті, сільському господарстві і на підприємствах житлово-комунального комплексу при реалізації Постанов «Про забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж» (від 05.05.97 р. № 409), № 1313 «Про затвердження Програми запобігання та реагування на надзвичайні ситуації» (від 22.08.2000 р.).

Інформаційне повідомлення підготував В. П. Корольов, Донбас. державна академія будівництва і архітектури



НАШИ ПОЗДРАВЛЕНИЯ

ЕМЕЛЬЯНОВУ ОЛЕГУ АНДРЕЕВИЧУ — 75 ЛЕТ



1 октября 2003 г. Емельянову Олегу Андреевичу, руководителю лаборатории технической диагностики Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) исполнилось 75 лет.

С 1943 г. он принимал участие в Великой Отечественной войне. После войны в 1975 г. окончил с отличием сварочный факультет Ростовского-на-Дону института сельхозмашиностроения. С 1957 г. работал на Новокраматорском машиностроительном заводе мастером, конструктором, ведущим инженером, начальником группы надежности горнорудного оборудования.

В процессе практической работы на НКМЗ участвовал в проектировании, введении в производство, монтаже и доводке в эксплуатации комплексов горно-транспортных машин непрерывного действия. Начиная с 1959 г. работы по повышению надежности и технологичности сварных конструкций землеройных машин проводились в тесном содружестве с отделом прочности Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. По результатам этих работ для нужд завода в соавторстве были написаны книги: «Ремонт металлоконструкций электросваркой», «Надежность и производительность комплексов горно-транспортных машин непрерывного действия» и кандидатская диссертация, которую Емельянов О. А. защитил в 1969 г.

Комплексный подход к решению проблем создания новой техники на основе обеспечения обратной связи между проектированием, изготовлением, монтажом и эксплуатацией является характерной особенностью его работы. В 1969 г. был организован целенаправленный мониторинг за работой комплексов на НКМЗ (Украина), на ряде предприятий ФРГ и ГДР, который позволил выявить их достоинства и недостатки, успешно работать над совершенствованием отечественной техники.

С 1976 г. Олег Андреевич — доцент кафедры «Сварочное производство» Краматорского индустриального института.

Лаборатория технической диагностики, созданная под его руководством, в 1978 г. провела диагностику более 1500 кранов, выполнила различные инженерные работы по восстановлению их работоспособности и модернизации. Разработаны руководящие материалы по различным вопросам, возникающим при эксплуатации, ремонте и модернизации грузоподъемных кранов. Особенно плодотворны и в производственном, и в научном плане были хозяйственные работы с отделом главного механика НКМЗ. По итогам работ написан раздел «Мостовые краны в справочнике «Сварные строительные конструкции. Типы конструкций», изданном ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и монография «Мосты сварные крановые. Конструкция. Нагруженность. Диагностика. Обеспечение ресурса», а также 37 печатных работ. Практику и научную деятельность на производстве юбилей совмещает с преподаванием в ДГМА и в Головном учебно-методическом центре Госназдорхрантруда Украины, а также активно работает в Технических комитетах ТК-78 и ТК-16.

Сердечно поздравляем Олега Андреевича с 75-летием! Желаем здоровья, новых творческих свершений, благополучия и счастья!

Правление Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики.
Редколлегия и редакция журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



Редколегія, редакція журналу та колектив відділу «Технічна діагностика зварювальних конструкцій» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України щиро вітають багатолітнього дописувача журналу, колегу-науковця, старшого наукового співробітника відділу «Конструкційної міцності матеріалів в робочих середовищах» Фізико-механічного інституту Національної академії наук України **Скальського Валентина Романовича** з успішним захистом докторської дисертації на тему «Розробка методик і засобів оцінки об'ємної пошкодженості та руйнування матеріалів і виробів за параметрами акустичної емісії» та бажають йому нових творчих успіхів і наукових здобутків.

КОНСТРУКЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭМА-СИСТЕМ УД-ЭМА-РСП-01, РАБОТАЮЩИХ В УСТАНОВКАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТАРОГОДНЫХ РЕЛЬСОВ

В. И. ГОРДЕЛИЙ

Известно, что расходы на проведение путевых работ составляют значительную часть эксплуатационных расходов на содержание путевого хозяйства. Одним из реальных путей их снижения является внедрение ресурсосберегающих технологий при их проведении, в частности, вторичное использование снятых с пути старогодных рельсов.

Рельсы с обнаруженными в них дефектами (ОДР — острodefектные рельсы) и изъятые с пути нецелесообразно пускать на переплавку, а экономически более выгодно ремонтировать. Снятые с пути старогодные рельсы направляются на специальные предприятия — рельсосварочные поезда (РСП), предназначенные для их ремонта и последующего вторичного использования.

Старогодные рельсы имеют достаточно высокий уровень дефектности. Средний выход ОДР на 10 км пути в месяц за 2000 год колеблется в пределах от 0,1 до 0,3. При этом на отдельных неблагоприятных участках пути эта величина может превышать 5 ОДР в месяц на 10 км пути. Таким образом, актуальна задача своевременного выявления таких рельсов из партии старогодных, поступивших на РСП для обработки и последующей сварки.

Целью входного контроля старогодных рельсов является обнаружение дефектов в рельсах, подлежащих восстановлению и сварке. Проведение входного контроля приобретает особое значение в связи с внедрением в последние годы на ряде РСП механической обработки поверхности головки рельса с целью восстановления первоначального ее профиля. Своевременное обнаружение дефектных рельсов и исключение их из числа подлежащих дальнейшей механической обработке и сварке обеспечит существенную экономию материальных и трудовых ресурсов, позволит в конечном итоге существенно повысить эффективность производства и снизит себестоимость продукции.

До последнего времени входной контроль старогодных рельсов, поступающих для обработки на РСП, сводился к проведению визуального осмотра для отбраковки рельсов с видимыми наружными дефектами, что явно недостаточно. Специально разработанные установки для обнаружения внутренних дефектов отсутствовали. Однако визуальный метод контроля позволяет выявить только поверхностные дефекты (выбоины, выколы, трещины, повреждения коррозионного характера, вмятины и т. д.). Вместе с тем кроме указанных в рельсах интенсивно развиваются дефекты 2, 3 и 5-й групп, многие из которых визуально не обнаруживаются.

Ультразвуковой контроль (УЗ) с использованием контактного способа ввода и приема УЗ колебаний (проводился, в частности, на РСП-29 Западно-Сибирской железнодорожной дороги, ст. Промышленная с использованием модернизированного съемного дефектоскопа Поиск-10Э, впоследствии — АВИКОН-01), не обеспечивает надежный контроль без тщательной очистки головки рельса от ржавчины, пыли, масляных пятен и других загрязнений, связанных с условиями эксплуатации рельсов и их последующим хранением в штабелях под открытым небом. Каждый рельс контролируется в отдельности. Однако применяемый процесс очистки и подготовки рельса под контроль требует больших материальных и трудовых затрат, а в случае обледенения рельсов не реализуется вообще.

Для решения изложенной выше проблемы в НПП «ВИГОР» под руководством автора разработана установка **УД-ЭМА-РСП-01**, предназначенная для входного автоматизированного бесконтактного УЗ неразрушающего контроля старогодных рельсов, в которой реализован электромагнитоакустический способ возбуждения и регистрации УЗ колебаний (ЭМА-способ).

Установка обеспечивает проведение контроля рельсов после проведения предварительной (грубой) очистки без нарушения технологического цикла. Обнаруженные дефекты регистрируются в ведомости контроля с указанием вида и месторасположения; забракованные рельсы контролируются повторно, при необходимости участок контролируется вручную. При подтверждении наличия дефекта рельс отправляется для вырезки дефектного участка.

Отличительными особенностями ЭМА-способа являются:

*возбуждение и регистрация УЗК без применения контактной жидкости;
возможность генерирования и регистрации УЗ колебаний различной поляризации (продольной, поперечной, поверхностных волн);*

способность возбуждать и регистрировать УЗ колебаний в широком диапазоне изменения частот, температур и скоростей движения объектов контроля;

наличие воздушного зазора, существенно повышающего надежность и долговечность УЗ преобразователей, механического оборудования и, как следствие, всего комплекса приборов контроля в целом.

Кроме того, требования к качеству подготовки поверхности объектов контроля при реализации ЭМА-преобразователей оказываются значительно ниже, чем при использовании контактных способов. Это открывает возможность реализовать неразрушающие методы контроля в областях и с объектами, где они до настоящего времени не эксплуатируются. Электромагнитоакустические преобразователи (далее ЭМА-преобразователи) позволяют контролировать рельсы и рельсовые плети в процессе движения преобразователей относительно рельсов бесконтактно. Это дает возможность проводить автоматизированный контроль рельсов, слабо зависящий от скорости взаимного перемещения их относительно излучателей — приемников ультразвука. Существенно повышать, таким образом, производительность контроля, не снижая при этом его достоверности.

Основным элементом установки **УД-ЭМА-РСП-01** является дефектоскопический комплекс, состоящий из стойки генераторной, блока ЭМА-преобразователей, усилительного и согласующего блоков. Электрические сигналы, вырабатываемые генераторной стойкой, после согласования подаются на ЭМА-преобразователи, которые возбуждают в контролируемом рельсе УЗ колебания. Отраженные от отражателя УЗ волны возвращаются в ЭМА-преобразователь, где преобразовываются в электрический сигнал. Преобразованный сигнал после усиления подается на вычислительный комплекс для обработки и регистрации (рис. 1).

В данной схеме, кроме уже использованных, введены следующие обозначения: ДП1, ДП2 — датчики пути; ДНР1–ДНР3 — датчики наличия рельса.

ЭМА-преобразователи размещены на следящей каретке, служащей для центровки положения преобразователей по оси поверхности катания головки рельса. Система слежения служит для позиционирования положения рельса при подаче его на контроль и в процессе проведения контроля. Зазор между рабочей поверхностью ЭМАП и поверхностью катания головки рельса составляет не более 1 мм.

Подача рельсов на контроль может осуществляться в двух режимах — ручном и автоматическом. Причем, в автоматическом режиме управление осуществляется системой автоматики, а в ручном — оператором с пульта управления.

В процессе контроля устанавливается код дефекта и его местоположение в рельсе. Результаты контроля сохраняются для последующей расшифровки и принятия решения в автоматическом и ручном режимах. Отметка дефектных зон осуществляется дефектоотметчиком. Время контроля определяется скоростью перемещения рельса по рольгангу. Механизм слежения может выводиться из зоны контроля для периодического обслуживания и ремонта.

В процессе контроля оператору в реальном режиме времени на экране монитора дефектограммы получаемых от ЭМАП отображаются виде В-разверток (при этом контрастность цвета пропорциональна

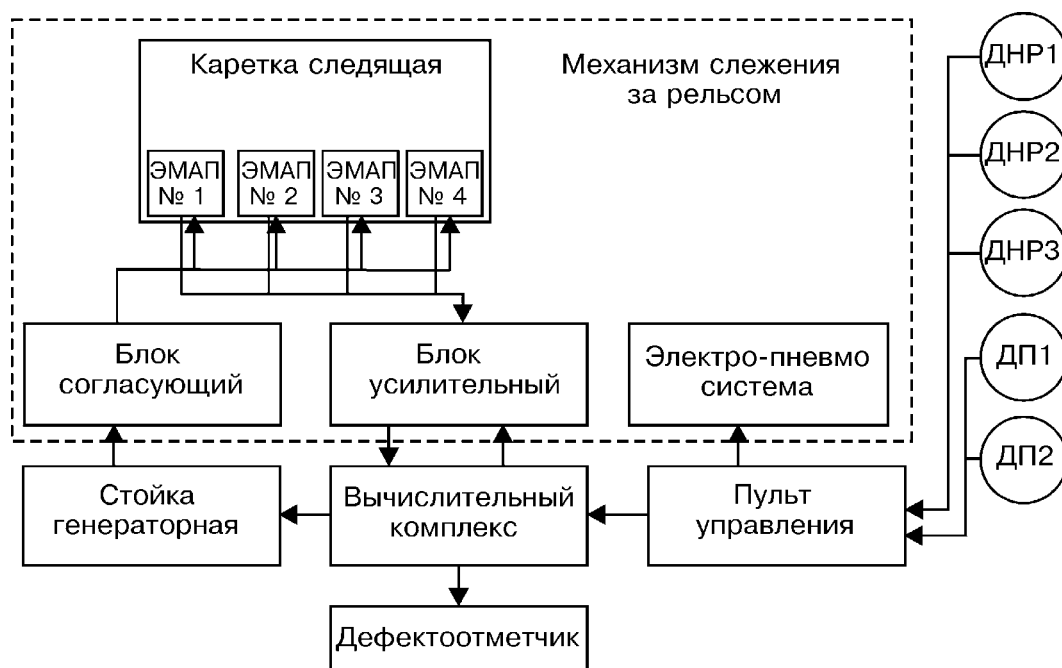


Рис. 1. Структурная схема установки УД-ЭМА-РСП-01

Тип дефекта (по НТД / ЦП-1,2,3-93)	Количество выявленных дефектов	
	УД-ЭМА-РСП-01	«АВИКОН-01»
Дефекты первой группы (отслоения или выкрашивание металла на поверхности катания головки рельса)	243	98
Дефекты второй группы (поперечные трещины в головке рельса)	61	55
Дефекты третьей группы (продольные горизонтальные и вертикальные трещины в головке рельса)	4	4
Дефекты четвертой группы (пластические деформации, износ головки рельса)	95	25
Всего:	475	236

амплитуде сигнала). Кроме этого, оператор при необходимости может просмотреть А-развертки сигналов, получаемых от ЭМАП.

Установка для входного УЗ неразрушающего контроля старогодных рельсов в условиях РСП с применением ЭМАП обеспечивает обнаружение в старогодных рельсах типа Р50 и Р65 дефектов следующих типов (кодов):

- поперечные (код 20.2, 21.2, 24.2, 25.2, 26.3, 27.2, 56.3), продольные вертикальные (код 30В.2, 50.2, 60.2), продольные горизонтальные (код 30Г.2, 52.2, 55.2) и продольно-наклонные трещины (код 11), а также оценку степени коррозионных повреждений подошвы.

Установка обеспечивает выявление в контрольной плети все заложенные в них дефекты. В свою очередь дефектоскопом «АВИКОН-01» не были обнаружены некоторые заложенные в плети дефекты (21, 30В), уверенно выявленные установкой.

Перечисленные выше особенности программных и аппаратных узлов установки позволили добиться требуемой надежности и качества входного НК старогодных рельсов в условиях РСП. Об этом свидетельствуют в частности результаты опытной эксплуатации головного образца установки на РСП-21 (г. Лодейное Поле, Карелия) за период с 20.03.2002 г. по 1.05.2003 г.

Анализ показывает, что установкой было выявлено в два раза больше дефектов, чем съемным дефектоскопом АВИКОН. При этом ею выявлено 65 внутренних дефектов (дефекты второй и третьей групп) против 59, выявленных дефектоскопом АВИКОН-01.

На рис. 2 представлены фотографии выявленных установкой дефектов и особенности записи информации.

Аппаратная часть дефектоскопического комплекса состоит из электронной аппаратуры стойки и системы регистрации и обработки информации (на базе одного или двух персональных компьютеров).

Внешний вид механизма слежения за рельсом установки представлен на рис. 3.

Установка проста в обслуживании благодаря программному обеспечению и отличается простотой конструкции.

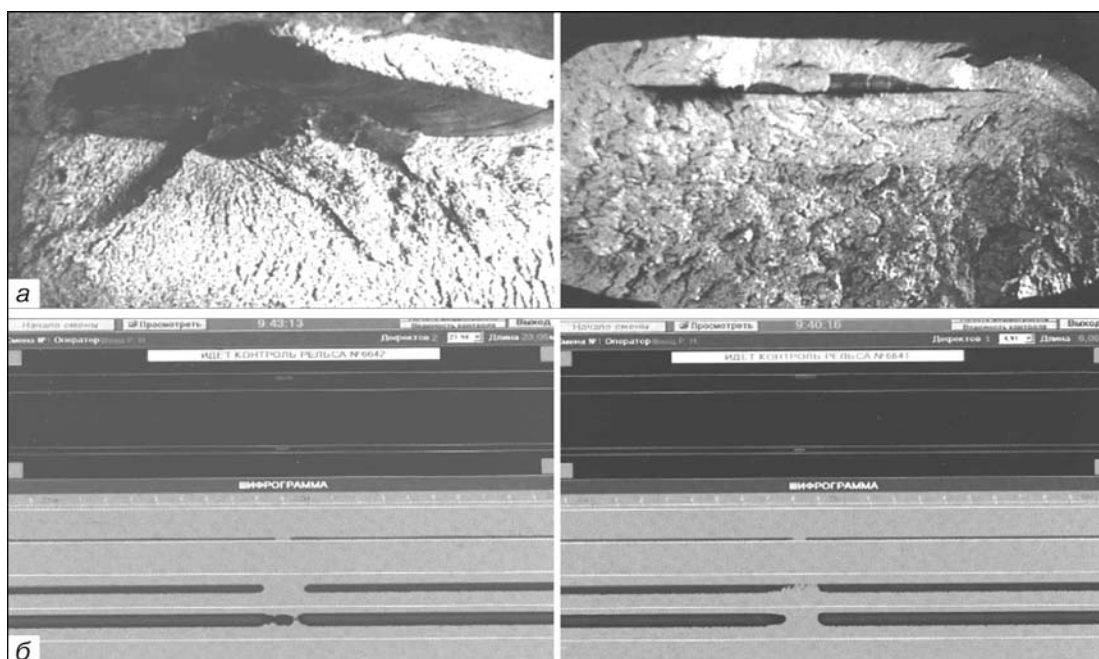


Рис. 2. Дефекты рельса (а) и их запись (б)

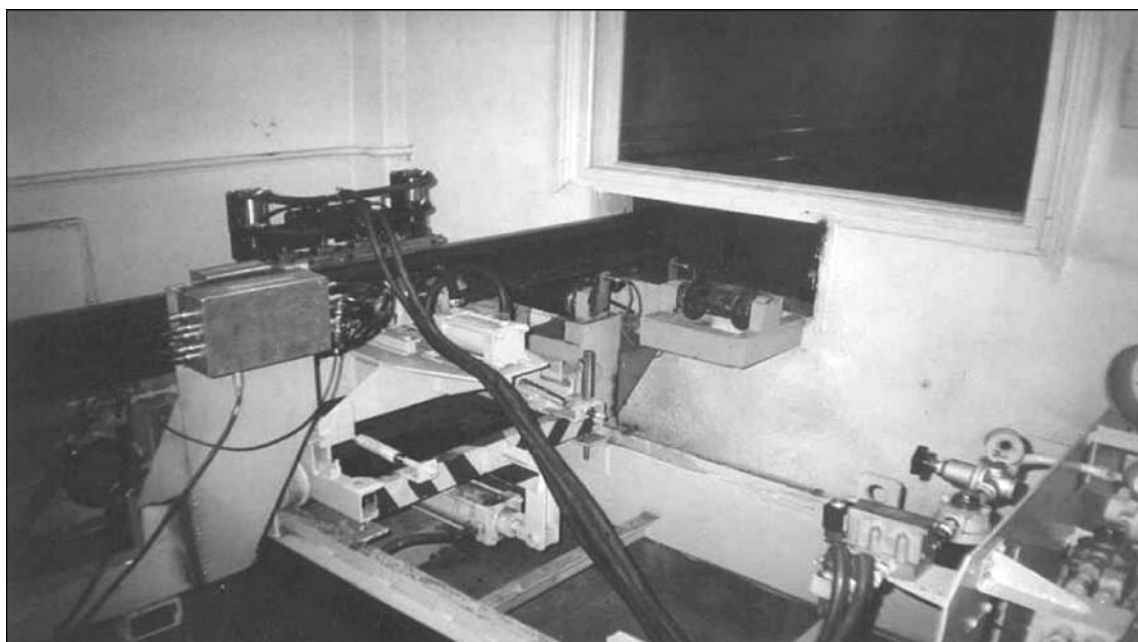


Рис. 3. Внешний вид механизма слежения установки УД-ЭМА-РСП-01

Изложенные выше преимущества ЭМА-метода контроля рельсов, первые результаты опытной эксплуатации установки позволяют сделать вывод, что разработанная в НПП «ВИГОР» установка **УД-ЭМА-РСП-01 является новым эффективным средством контроля рельсов**. ЭМА-метод контроля рельсов имеет широкие перспективы развития его использования в рельсовой дефектоскопии, в том числе: контроль рельсов, лежащих в пути, мобильными средствами скоростного контроля; выходной контроль рельсовых плетей на РСП после сварки; выходной контроль рельсов на предприятиях-изготовителях.

Создание автоматизированной установки для входного контроля старогодных рельсов в условиях РСП с применением ЭМАП обеспечит новый уровень культуры производства и целый ряд экономических показателей:

из проекта исключаются такие дорогостоящие и неблагоприятные в экологическом отношении элементы, как система водоподготовки, подачи и утилизации воды, используемой для обеспечения акустического контакта;

отпадает необходимость в удалении с поверхности рельсов коррозионных повреждений и ржавчины; упрощается процедура подготовки рельсов к контролю в зимних условиях и их хранения благодаря возможности контроля рельсов при температуре от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$;

исключается укладка в путь старогодных рельсов с дефектами.

Выводы. Установка УД-ЭМА-РСП-01 — средство НК, обладающее надежностью и достоверностью выявления дефектов, по крайней мере, не уступающее применяемым на РСП УЗ дефектоскопам контактного типа последнего поколения. В дальнейшем планируется создание с учетом достигнутых результатов подобной установки для скоростного НК, уложенных в путь рельсов на базе ЭМАП.

За более подробной информацией просим обращаться по адресу:
107174, г.Москва, ул. Новая Басманная, д. 2; а/я 25, НПП «ВИГОР».
Тел./факс: (095) 262-85-35; e-mail% cevig@rambler.ru.

МЕТОД ТЕЧЕИСКАНИЯ SPECTROLINE — ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

КОЗИН А. Н.

В 1955 г. специалисты компании Spectronics, США, запатентовали (патент США №5149453) метод течеискания, который нашел широкое применение в автомобильной промышленности под торговой маркой Tracerline и был мало известен в СССР. Это нашло свое подтверждение в 1985 г., когда был принят ГОСТ 26790–85 «Техника течеискания. Термины и определения». В терминах и определениях этому методу не нашлось места, а в ГОСТ 26182–84 «Люминесцентный метод течеискания», который казалось бы должен описывать этот метод и требования к его применению, был сформулирован метод, при котором индикаторное вещество наносилось на места, в которых ожидаются утечки пробного вещества — газа или жидкости, вызывающих люминесценцию индикаторного вещества. При этом требовалось соблюдение целого ряда условий по освещенности, удалению индикаторного вещества, очистке объектов контроля от пробного вещества и пр.

Такой сложный способ течеискания, естественно, не нашел широкого применения в СССР, так как уже существовали достаточно малогабаритные электронные течеискатели, которые имели собственные недостатки, но контроль ими был более технологичным.

После длительного этапа разработок и испытаний в 1989 г. компания Spectronics представила на рынок газовых систем кондиционирования и охлаждения строительную систему течеискания под торговой маркой Spectroline, которая состояла из разнообразных приспособлений для впрыска концентрированного люминофора в систему циркуляции хладагента, удобных в применении капсул и картриджей с люминофором, мощных ультрафиолетовых (УФ) облучателей и технологию, которая состояла из набора очень простых операций. Технология заключается в вводе в систему, находящуюся под давлением, люминофорного концентрата, который переносится хладагентом по всем составляющим системы кондиционирования или охлаждения, не оказывая никакого влияния на работу системы. В местах даже микроскопических течей, где происходит утечка хладагента, люминофор окрашивает наружные поверхности, которые легко обнаруживаются благодаря люминесцентному свечению в УФ свете. Мощные УФ облучатели создают такую интенсивность УФ облучения, при которой обычно нет необходимости в специальном затемнении, применении лестниц и подъемных платформ, так как места течей видно с расстояния более 5 м!

Особенно ярко преимущества метода по сравнению с другими традиционно используемыми методами поиска и локализации утечек хладагента на основе фреона проявляется при выполнении контроля на открытом воздухе — традиционные галогенные и электроразрядные течеискатели при порывах ветра или конвективных потоках воздуха не могут обнаружить и локализовать места течей, как и при маскировании одной течи другой. Другое важное преимущество состоит в обнаружении утечек хладагентов, не содержащих фреона, которые все больше применяются в системах кондиционирования и охлаждения, например, R-134A.

При очевидной простоте, производительности и удобстве в работе метод Spectroline чрезвычайно экономичен, универсален, имеет высокую чувствительность, безопасен. Метод нормирован Национальным Институтом Стандартизации США и Американским обществом инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, а также одобрен большинством производителей кондиционеров и холодильных установок.

Этот метод уже давно нашел широкое применение для контроля герметичности жидкостных систем, использующих масла, антифризы, топливо, воду, гидравлические жидкости и т. п. Например, многие автосервисные центры пользуются им для обнаружения утечек в двигателе, трансмиссии, гидроусилителе руля, масляной и топливной системе, ну и конечно же, хладагента в кондиционерах. В последние годы многие российские производители антифризов и теплоносителей автономных систем (торговые марки AGA, DIXIS, За рулем, Гольфстрим, УАС и др.) начали добавлять люминофор в свою продукцию, чтобы потребители могли легко обнаружить место утечки при УФ облучении, но об этом в другой статье.

Ниже мы попытались представить метод Spectroline в форме наиболее часто задаваемых вопросов и ответов.

Метод Spectroline в вопросах и ответах**В. Что представляет собой флуоресцентное обнаружение течей методом Spectroline?**

О. При флуоресцентном обнаружении течей Spectroline (патент США №5149453) используются УФ облучатели для контроля и люминесцентные красители AR-GLO[®], которые совместимы с устройствами

кондиционирования и охлаждения любых размеров и со всеми обычно используемыми хладагентами — в том числе и R-134a! Люминофор вводится в систему кондиционирования и охлаждения во время ее работы посредством дозирования люминофора. Метод Spectroline определяет местоположение сложных течей, течей, которые невозможно обнаружить с помощью других методов, и даже тех, которые имеют натекание менее 3,5 г в год, и никогда не дает ложных отметок. Метод работает фактически со всеми хладагентами, сберегает дорогостоящие хладагенты и совершенно безопасен для компрессоров, связанных с ними деталей систем кондиционирования/охлаждения и хладагентов.

В. Какие типы течей можно обнаружить с помощью метода Spectroline?

О. Течеискание Spectroline обнаруживает все виды течей систем кондиционирования/охлаждения — большие или маленькие, где бы они не находились — в трубопроводах, паяных соединениях, арматуре, клапанах, компрессорах и даже в сальниках.

В. Сколько времени занимает поиск течи методом Spectroline?

О. Время поиска зависит от скорости распространения люминофора в системе и размера течи. Обычно это занимает несколько минут. Однако очень маленькие течи настолько медленные, что вам, возможно, придется дать люминофору проциркулировать один или два дня прежде, чем вы их увидите. Но когда люминофор достаточное время проциркулирует, вы увидите течи, как только направите на них УФ облучатель.

В. Какие преимущества течеискания Spectroline?

О. Метод Spectroline уменьшает время сервисного обслуживания благодаря более быстрому обнаружению течей. Он сохраняет хладагент, исключая ненужные его перезарядки, и максимизирует эффективность, уменьшая расход электроэнергии. Уменьшенное потребление хладагента и более быстрое обслуживание приводят к снижению затрат на ремонт, повышению удовлетворения потребностей заказчиков и возрастанию прибыли. К тому же, так как метод Spectroline делает течеискание таким быстрым и легким, устройства кондиционирования и охлаждения могут работать с максимальной эффективностью без потерь электроэнергии.

В. Как применяют метод Spectroline?

О. Нет ничего проще. Просто следуйте этим простым рекомендациям: 1) залейте заранее отмеренное количество люминофора AR-GLO в наливное отверстие устройства подачи люминофора Mist Infuser, наклоняя его для выхода воздуха (пропустите этот шаг, если вы используете картриджи с люминофором EZ-Ject, либо заранее заполненные капсулы GLO-STICK); 2) подсоедините EZ-Ject картридж с люминофором, или капсулу GLO-STICK или Mist Infuser между манометром и отверстием для обслуживания; 3) медленно откройте клапаны, чтобы постепенно добавить AR-GLO в систему и подождите некоторое время для циркуляции люминофора в системе.

Проверьте герметичность системы с помощью облучателя УФ излучения. Все течи будут ярко светиться, показывая свое точное расположение.



Ультрафиолетовый облучатель
на 12 В

В. Наносят ли люминофоры вред системе?

О. Нет. Испытания в соответствии со строгими стандартами Американского общества по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха (ASHRAE 97 и 86) доказали безопасность люминофоров AR-GLO. Их нет необходимости удалять из системы кондиционирования и охлаждения. Они специально разработаны, чтобы оставаться в системе, чтобы вы могли легко убедиться, что ремонт прошел успешно, а также для обычных проверок при обслуживании в будущем.

В. Как мне начать использовать флуоресцентный поиск течей Spectroline?

О. Мы предлагаем широкий спектр наборов для течеискания, УФ облучателей, люминофоров и принадлежностей для ваших специфических потребностей. Наборы полностью укомплектованы для работы. Вам нужно только повторно заказать люминофоры, которые вы уже использовали.

Итак, если Вы дочитали этот материал до конца, значит Вы заинтересовались и, возможно, присоединитесь к компаниям, применяющим метод Spectroline — по данным на начало 2001 г. более 30 миллионов систем кондиционирования и охлаждения во всем мире уже испытаны с помощью метода Spectroline. Эта цифра впечатлит даже неисправимых скептиков.

За дополнительной информацией и приобретением стартового прибора Spectroline обращайтесь к официальному представителю Spectroline в Украине — компании ДП-Тест по адресу:

04050, Киев-50, а/я 50.

Тел./факс: (044) 247-67-18, e-mail: dp-test@ndt-ua.com.

Научно-производственная фирма Специальные Научные Разработки

СНР

61121, г. Харьков, ул. Светлая, 10, кв.16, тел./факс (0572) 64-36-13,
тел. (0572) 64-99-85, 26-32-06, e-mail: bezlyudko@yahoo.com

Приборы и методики неразрушающего контроля и оценки ресурса.



✓ **Коэрцитиметры** – для неразрушающего контроля (по СНГ-стандарту ГОСТ 30415-96) механических свойств, структуры металлопроката, напряженно-деформированного (усталостного) состояния и ресурса конструкций и оборудования из стали и чугуна, контроля режимов термообработки, сортировки по маркам и т.д. Портативные цифровые приборы с сетевым (**КРМ-Ц**) или автономным питанием (**КРМ-Ц-К2М** и **КРМ-Ц-К3**). Микропроцессорный

(**КРМ-Ц-К3**) вариант измеряет, кроме коэрцитивной силы, и другие параметры предельной петли гистерезиса образца (индукцию насыщения, остаточную индукцию, релаксационную коэрцитивную силу и др.), имеет большую память данных.

КРМ-Ц-МА – магнитный анализатор – приставка к ПЭВМ для исследования предельной и частных петель образца (простой и практичный аналог баллистических установок БУ).

Методики технического диагностирования и ресурса грузоподъемных кранов и сосудов давления согласованы Госгортехнадзором РФ.



✓ **Магнитометры** – для контроля остаточной намагниченности деталей, торцов труб, для контроля полей в магнитопорошковой дефектоскопии и "магнитной загрязненности" рабочих мест и оборудования, для измерения параметров постоянных магнитов и т.д.:

– вариант **КРМ-Ц-Т** – для измерения постоянных полей, **КРМ-Ц-Т1** – с сигнализацией характерного порога допустимой при сварке остаточной намагниченности 30 Гс, **КРМ-Ц-ТД** – с локализацией аномалий естественной намагниченности металлоконструкций как мест вероятного зарождения эксплуатационных дефектов (так называемая "магнитная память");
– вариант **КРМ-Ц-ТМ** – процессорный универсальный магнитометр для переменных, постоянных, импульсных полей, с памятью данных и каналом связи с ПЭВМ.

Удобный датчик-щуп или приставной датчик на выносном кабеле.



✓ Бесконтактный **толщиномер-дефектоскоп КРМ-Ц-Дельта** – ультразвуковой ЭМА-прибор, работает при температурах от -25°C и по горячему металлу в несколько сот градусов, без контактной жидкости, без специальной зачистки поверхности, по краске или через воздушный зазор около 1 мм, с погрешностью не более 0,1 мм, с отображением на экране зондирующего и донных импульсов, с запоминанием всех эхограмм и передачей их по каналу связи в ПЭВМ для документирования результатов контроля.

Все приборы имеют портативное и автономное исполнение, **госповерку, сертификат Госстандарта Украины и России, включены в их Госреестры**, пригодны для широкого применения рядовым персоналом в сложных условиях эксплуатации.

Все приборы имеют также вариант мощного стационарного исполнения для работы в технологических линиях цехов металлургических комбинатов, в составе АСУТП.

Наши приборы – это мировая методическая и техническая новизна при хорошем сочетании цена/эффективность, годовая гарантия и последующее сервисное обслуживание, с обучением персонала особенностям эксплуатации.