Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 1, 2011

Издается с января 1989 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Б. Е. ПАТОН

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

Адрес редакции

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

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа

Свидетельство о государственной регистрации КВ4787 от 09.01.2001

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

СОДЕРЖАНИЕ

Уникальная технология ликвидации подводных аварий нефте-, газопроводов, разработанная украинскими учеными
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ
ЛОБАНОВ Л. М., НЕХОТЯЩИЙ В. А., РАБКИНА М. Д., ПЕРЕПИЧАЙ А. А., БЕЛОСТОЧНЫЙ В. В., БЕЛОСТОЧНЫЙ А. В., ЧИЖИЧЕНКО В. П. Магнитный контроль и структурно-текстурные особенности металла кислородных баллонов
ХАРЧЕНКО Л. Ф., ВОЛОШКЕВИЧ И. Г. Исследование акустико-
эмиссионных характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты
МАТЮК В. Ф., ОСИПОВ А. А., СТРЕЛЮХИН А. В.
Моделирование магнитного состояния ферромагнитного стержня в продольном постоянном магнитном поле
КОЛБІН І. Б., ВОЛКОВ Ю. О. Спосіб виявлення площинних
відбивачів, орієнтованих в напрямі, близькому до напряму поши- рення поздовжніх ультразвукових хвиль. 2. Теоретичне обгрунту- вання та експериментальне підтвердження отриманих результатів
ПРОИЗВОЛСТВЕННЫЙ РАЗЛЕЛ
ХОРОШЕВ В. Н. ВОЛЧКОВ Ю. Е. ЛЕКОПОВ А. С.
КОСИЦЫН Е. М., КОЗИН Ю. Н. Гамма-дефектоскопы для радио- графического и радиометрического контроля качества промыш- ленных изделий
ГОЛИНЬКО В. М. Особенности технического диагностирования и восстановления работоспособности резервуара вместимостью 50 тыс. м ³ из сварных рулонных заготовок с использованием стали 16Г2АФ
ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ В. И., КАСАТКИН С. Б., ЯЩУК В. А.
Исследование возможности определения степени повреждае-
ниях конструкционной стали 09Г2С магнитометрическим методом
ОПИР Н. В., БЕРЕГУЛЯК О. Р. Вимірювання глибин канавок
еталона чутливості за його зображенням45
ОРЛОВИЧ А. Е., СЕРЕБРЕННИКОВ С. В., СИРИКОВ А. И.
ВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ
СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ
ХОРЛО Н. Ф., СЕРГЕЕВА Н. А. Динамический подход к органи- зации проведения специальной подготовки специалистов неразру-
шающего контроля
ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ
Підсумки конкурсу УТ НКТД серед студентів

на кращу дипломну роботу	60
Техническая диагностика ответственных объектов	62
В. А. Троицкому – 75	63

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

Quarterly Scientific-Technical and Production Journal

TECHNICAL DIAGNOSTICS -DESTRUCTIUE TESTING

Founded in January, 1989

Nº 1, 2011

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

Publisher: International Association «Welding»

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief B. E. PATON

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

Address

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

Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors

T. V. Ushtina

Electron galley

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

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

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

CONTENT

Unique technology developed by Ukrainian scientists for liquida-

SCIENTIFIC-TECHNICAL

LOBANOV L.M., NEKHOTYASHCHIY V.A., RABKINA M.D., PEREPICHAY A.A., BELOSTOCHNY V.V., BELOSTOCHNY A.V., CHIZHICHENKO V.P. Magnetic control and structural-textured peculiarities of metal of oxygen cylinders NEDOSEKA A.Ya., NEDOSEKA S.A., GRUZD A.A., YARYEMENKO M.A., KHARCHENKO L.F., VOLOSHEVICH I.G. Investigation of acoustic-emission characteristics of steel	7
12Kh18N10T at the temperature of 560 °C. Information 1. Methods and some results	13
MATYUK V.F., OSIPOV A.A., STRELYUKHIN A.V. Modeling of magnetic state of ferromagnetic core in longitudinal constant magnetic field	20
KOLBIN I.B., VOLKOV Yu.O. Method of detection of in-plane reflectors oriented in the direction close to the direction of spreading the longitudinal ultrasonic waves. 2. Theoretic grounding and experimental confirmation of obtained results	28

INDUSTRIAL

KHOROSHEV V.N., VOLCHKOV Yu.E., DEKOPOV A.S., KOSITSYN E.M., KOZIN Yu.N. Gamma flaw-detectors for radio- graphic and radiometric testing of quality of industrial products	33
ration of serviceability of a tank of 50 thousand m ³ capacity of welded coiled blanks using steel 16G2AF	37
Investigation of possability to determine the degree of metal damage at cyclic loading in welded joints of structural steel 09G2S using magnetometric method	42
OPIR N.V., BEREGULYAK O.R. Measurement of depths of grooves of sensitivity reference according to its image	45
Automated electric control of state of high-voltage isolators under voltage	48

CERTIFICATION AND STANDARDIZATION

KHORLO N.F., SERGEEVA N.A. Dynamic approach to the organization of special training of specialists on non-destructive testing54

NEWS AND INFORMATION

Results of US NDTTD competition for students	
for the best diploma work	60
Technical diagnostics of critical facilities	62
V.A. Troitskii is 75	63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОДВОДНЫХ АВАРИЙ НЕФТЕ-, ГАЗОПРОВОДОВ, РАЗРАБОТАННАЯ УКРАИНСКИМИ УЧЕНЫМИ

3 декабря 2010 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины состоялась презентация революционной разработки украинских ученых: технологии и конструкций, предупреждающих катастрофы, подобные той, которая произошла в апреле 2010 г. в Мексиканском заливе. В ней приняли участие представители научной общественности ряда институтов НАН Украины, Торгово-промышленной палаты Украины, сотрудники посольств, представители средств массовой информации и телевидения, были также приглашены представители администрации президента Украины, министерств, ведомств, летчик-космонавт Украины Л. К. Каденюк, а также представители нефтедобывающих компаний «Chevron», «Conoco Phillips», «Exxon Mobil», «Royal Dutch–Shell», «British Petrolium».

Открыл презентацию академик Б. Е. Патон. Он дал оценку произошедшей катастрофе у берегов США, которая стала наиболее масштабной в истории по последствиям для окружающей среды. Более миллиона баррелей нефти в воде, загрязнение побережья четырех американских штатов, миллиардные убытки компании «British Petrolium» и правительства США. Нефтяное загрязнение, последовавшее за ним загрязнение химикатами, уничтожающими нефть...

Последние тридцать лет технологии добычи нефти и газа совершенствуются, однако методы борьбы с последствиями аварий остаются прежними. Поэтому трагедия в Мексиканском заливе может повториться и в других странах. Вместе с тем люди не перестанут добывать углеводороды — ведь, по прогнозам на ближайшие десять лет, спрос на них вырастет на 15...20 %.

Катастрофа вынудила ведущие страны мира предпринять беспрецедентные меры, направленные на создание новых подходов к обеспечению безопасности при добыче углеводородов на морских шельфах. Лидеры стран-членов Большой двадцатки уделили этому вопросу особое внимание на саммите в Торонто, что нашло свое отражение в тексте коммюнике. Страны Европы,



Выступление академика Б. Е. Патона



Фрагмент аварийного выброса нефти из скважины в Мексиканском заливе

которые имеют свои территориальные воды, решили пересмотреть правила для компаний, занимающихся добычей нефти и газа на их шельфах. Реакция правительства России на аварию в Мексиканском заливе также не заставила себя долго ждать. Она много в чем повторяет подходы американской стороны. Через месяц после катастрофы в Мексиканском заливе российский президент дал поручение правительству разработать законопроект «О защите морей России от нефтяного загрязнения», который должен регулировать вопросы обязанностей и ответственности добывающих компаний в случае загрязнения нефтью российского шельфа.

В Украине еще с советских времен эксп-

луатируют месторождения нефти и газа на Черноморском шельфе, сегодня намечается освоение новых месторождений. Кроме того, в Черном море на глубине ниже 50 м залегают огромные массы сероводорода, ядовитого и взрывоопасного газа. Если на дне прорвет трубу высокого давления, побережью будет нанесен непоправимый ущерб. Поэтому Премьер-министр Украины Н. Я. Азаров отметил, что «... после катастрофы в Мексиканском заливе у меня возникает вопрос цены. Если бы такая авария произошла в Крыму, то мы бы потеряли не только полуостров, но и все Черноморское побережье, начиная от молдавского кордона и заканчивая Таманью. Мы над этой ценой должны очень серьезно подумать».

Авария на Deepwater Horizon заставила прикаспийские государства по-новому посмотреть на планы увеличения объемов добычи на месторождениях Каспийского моря и транспортирования углеводородных ресурсов на внешние рынки танкерными флотами.

Министр энергетики Турции Танер Иилдиз указал на необходимость предпринять экстренные меры для защиты Черного моря от катастроф и аварий, связанных с добычей и транспортированием углеводородов. Турецкие власти рассматривают различные механизмы минимизации угроз подобных событий. Турция заявила о намерении создать фонд для защиты черноморских проток. Предусматривается, что в его создании примут участие зарубежные компании. Объем вложений в фонд может превысить 30 млрд дол. США. Этот вопрос обсуждался на международной конференции в Стамбуле с представителями двадцати ведущих мирових компаний, в том числе из России и Казахстана. За административными решениями последовали технологические. Четыре мировые нефтяные компании — «Exxon Mobil», «Conoco Phillips», «Chevron» (США), а



Авторы разработки отвечают на вопросы журналистов

также британско-голландская «Royal Dutch– Shell» — приняли решение о создании системы ликвидации вытоков нефти при освоении глубоководных районов.

Украина последовательно проводит политику обеспечения международной экологической безопасности, поддерживает инициативы государственных и негосударственных организаций по предотвращению аварий и экологических катастроф, связанных с добычей углеводородов, как наиболее опасных для нынешнего времени и будущего человечества, ведет активные разработки в этой сфере. Наше государство обратилось к мировому сообществу с предложением объединить и интенсифицировать усилия в решении этой одной из наиболее серьезных угроз международной безопасности. Президент Украины в своем выступлении на заседании Генеральной ассамблеи ООН в сентябре 2010 г. уже объявил ряд предложений Украины в сфере международной безопасности.

Правительство Украины, учитывая необходимость гарантирования безопасности при организации добычи углеводородов на шельфе Черного моря и участии нашей страны в международных программах, поручило Национальной академии наук Украины совместно с УНЦВТ Национального университета обороны Украины разработать технологии предупреждения, а в случае их возникновения, ликвидировать подобные аварии в предельно короткие сроки, с минимальными последствиями для окружающей среды.

Ученые Украины нашли ответ на вопрос, как быстро и эффективно ликвидировать аварии на прибрежных шельфах. На презентации академик Б. Е. Патон отметил «... мы создали разработку, ... предлагаем взять ее на вооружение в Украине при добыче нефти на шельфах и для использования за рубежом. Украинская технология принципиально новая, она позволяет решить одну из важнейших проблем защиты окружающей среды».

Коллектив авторов оказался удивительно гармоничным и взаимодополняющим. У каждого, как это бывает в слаженном экипаже, своя роль. Директор Института электросварки, президент НАНУ, академик Борис Евгеньевич Патон как дирижер управлял работой коллектива, внося в каждый элемент разработки частицу своей мудрости, опыта, интеллекта. Начальник УНЦВТ Национального университета обороны Украины, доктор технических наук, полковник Юрий Григорьевич Даник вместе с академиком Б. Е. Патоном генерировал идеи, принципы и варианты их реализации. Их творчески подхватывали и практически реализовывали в конструкторской документации и действующих изделиях председатель правления Опытного завода сварочного оборудования Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, доктор физико-математических наук Владимир Иванович Степахно и директор Государственного предприятия «Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ», лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники Валерий Степанович Романюк.

Один из авторов разработки, доктор технических наук, профессор Ю. Г. Даник рассказал о ней следующее: «Нам удалось взглянуть на проблему под иным углом зрения. Возьмем, к примеру, катастрофу в Мексиканском заливе. В результате взрыва на нефтедобывающей платформе и последовавшего за ним пожара устье скважины разгерметизировалось и нефть под высоким давлением хлынула в море. Как поступают ликвидаторы аварий в подобных случаях? Все сущес-

твующие на сегодня подходы основаны на том, чтобы перекрыть, остановить, загерметизировать утечку. Победить сопротивление мощнейшей природной силы — фактически надругаться над природой. Гарантирует ли это, что вытекание прекратится навсегда? Отнюдь. Около полутора тысяч законсервированных аварийных скважин в Каспийском море до сих пор продолжают сочиться. Да, и в Мексиканском заливе утечка полностью не устранена. Мы же заложили в основу нашей технологии совершенно противоположный принцип. С природой надо дружить и сотрудничать, а ее силу — направить туда, куда нужно нам, и суметь ею управлять».

Патентоведы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины провели предварительную экспертизу и установили, что ни



Модель аварийного модуля





Процесс соединения модуля с аварийной скважиной в гидробассейне

Соединение аварийной скважины с модулем для дальнейшей транспортировки жидкости по трубопроводу

в одном из известных ныне запатентованных изобретений предложенный нами принцип не применяется. На основе этого принципа коллектив ученых разработал аварийный модуль специальной конструкции, чем-то напоминающий стыковочный модуль космического корабля. Он присоединяется к месту утечки, компенсируя динамический удар вытекающего вещества, и осторожно перенаправляет поток в необходимом направлении. Таким образом, и вытекание прекращается, и добычу можно продолжить. Модуль может устанавливаться роботами или же сам быть роботом.

Если подобными аварийными модулями будут оснащены все добывающие платформы, это позволит не только оперативно ликвидировать аварии разных масштабов, но и возобновить добычу нефти и газа на законсервированных аварийных платформах и промыслах, потенциал которых далеко не исчерпан. Разработка украинских ученых сможет решить проблему обеспечения международной экологической безопасности при добыче углеводородов, а также будет способствовать развитию этой добычи.

Разработка украинских ученых нуждалась в экспериментальном опробовании. В Институте гидромеханики НАНУ были выполнены предварительные расчеты, Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки разработало конструкторскую документацию, а специалисты Опытного завода сварочного оборудования изготовили действующие макеты модулей. Для проведения испытаний была смоделирована скважина, из которой бил поток жидкости с заданными скоростью и интенсивностью. Эксперименты прошли успешно, действие принципа подтвердилось. Впечатлениями от проведенных испытаний на презентации поделился еще один из соавторов разработки В. С. Романюк: «Как только мы произвели соединение — поток стал управляемым. Поворотным механизмом мы закрыли поток, интенсивно бьющий в окружающее пространство и направили его уже в том направлении, которое нам необходимо. То ли это будет трубопровод, то ли это будет контейнер и т. п.».

Во время презентации был продемонстрирован видеоролик, иллюстрирующий последовательное моделирование операций по «укрощению» выброса нефти из скважины и переводу ее транспорта в нужном направлении, а также видеоматериал об испытании предложенного украинскими учеными способа и конструкций на лабораторном стенде в Институте гидродинамики НАНУ.

На презентации выступили также директор Опытного завода сварочного оборудования В. И. Степахно, летчик-космонавт Л. К. Каденюк, директор Института гидромеханики НАНУ академик В. Т. Гринченко, вице-президент Украинского национального комитета Торгово-промышленной палаты В. А. Коляденко и директор департамента внешнеэкономического сотрудничества Министерства иностранных дел Украины В. И. Лакомов.

Презентация вызвала живой интерес к обсуждаемой теме и предложению ученых Украины. Ряд журналистов задали вопросы разработчикам способа ликвидации аварий, касающиеся дальнейшего продвижения этой разработки, ее возможной экономической привлекательности для Украины.

Подготовлено редакцией журнала

МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ И СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛА КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, М. Д. РАБКИНА, А. А. ПЕРЕПИЧАЙ (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины), В. В. БЕЛОСТОЧНЫЙ, А. В. БЕЛОСТОЧНЫЙ (Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича), В. П. ЧИЖИЧЕНКО (ООО «Кислородсервис»)

Приведены результаты систематических измерений коэрцитивной силы в связи с возможными структурно-текстурными изменениями металла баллонов при их длительном функционировании. Установленная корреляция между толщиной оболочки и коэрцитивной силой открывает перспективу использования коэрцитиметрии для обнаружения опасных зон и повышения срока безопасной эксплуатации баллонов.

The results of systematic measurements of coercive force in connection with possible structural-textured changes of metal of cylinders during their long operation are given. The correlation between the thickness of a shell and coercive force was established which opens the prospect of application of coercimetry to detect dangerous areas and increase of level of safe operation of cylinders.

На сегодня известны две основные причины взрывов кислородных баллонов в Украине: человеческий фактор и изношенность газобаллонного парка. При этом разрушение баллонов носит в основном динамический характер. В отдельных случаях баллоны эксплуатируются 50...60 лет вместо положенных 40 лет [1], однако существующие методы контроля не позволяют своевременно оценить возможность их дальнейшей эксплуатации [2, 3]. Несмотря на глубокий анализ катастрофических разрушений и предпринимаемые меры [4,5], данной проблеме еще не уделяется должного внимания.

Следует отметить, что с влиянием человеческого фактора связаны, как правило, условия возникновения контакта кислорода как сильнейшего окислителя с горючими газами, смазочными материалами и пр. В результате их возгорания резко повышается давление, инициируются очаги разрушения и происходит взрыв баллона с образованием множества осколков [6]. Разрушение баллонов вследствие изношенности начинается преимущественно из одного очага и заканчивается разделением корпуса на несколько частей. По существу такие разрушения инициируются участками металла, в которых произошли изменения в процессе эксплуатации. Например, уменьшение толщины стенки вследствие коррозии или деградация механических свойств из-за нарушения структурно-текстурных характеристик металла. Возможность отбраковки баллонов при освидетельствовании хотя бы по одному из этих показателей методами НК (толщинометрией, коэрцитиметрией и т. п.) имела бы существенное значение в повышении безопасности при эксплуатации баллонов.

Цель работы — установить взаимосвязь между величиной коэрцитивной силы и толщиной стенки в результате систематических измерений этих параметров, а также исследований структуры металла после длительных сроков эксплуатации баллонов.

Объектом исследования служили баллоны, соответствующие ГОСТ 949–73, рабочее давление 14,7 МПа, емкость 40 л. Объективные данные некоторых из них представлены в табл. 1, в том числе после разрушения — для изучения структурно-текстурных параметров металла.

Рассмотрим химический состав металла после длительного срока эксплуатации баллонов. Анализ полученных результатов (табл. 2) подтверждает их соответствие химическому составу металла баллонов, изготовленных в последние годы на ММК им. Ильича, из стали Дс (табл. 3). Это свидетельствует о том, что в течение многолетней эксплуатации существенных изменений в составе стали не произошло.

Что касается механических свойств, то, как известно, прочностные характеристики стали определяются прежде всего легирующими элементами, создающими твердый раствор на основе железа, который, в свою очередь, в целом можно оценить углеродным эквивалентом (см. табл. 2, 3). Поскольку содержание углерода больше 0,12 %, углеродный эквивалент вычисляется по следующей формуле:

$$C_{_{3KB}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

В этой связи интересно отметить характер распределения углеродного эквивалента, который отличается несколькими максимумами (рис. 1), а также зависимость от его величины предела текучести металла (рис. 2).

[©] Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина, А. А. Перепичай, В. В. Белосточный, А. В. Белосточный, В. П. Чижиченко, 2011

🔍 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Относительно влияния химического состава стали на предел текучести следует подчеркнуть, что $\sigma_{\rm T}$ по существу слабо зависит от С_{экв}, поскольку необходимый уровень механических характеристик стали Дс достигается также за счет других видов упрочнения: измельчения размера зерна, увеличения плотности дислокаций, дисперсионного твердения, текстурного фактора и др. Так, в работе в [7] установлено, что предел те-



Рис. 1. Распределение величины углеродного эквивалента по выборке объемом N = 50 по данным завода-изготовителя (заштрихованная область соответствует химическому составу металла баллонов после их длительной эксплуатации)

кучести баллонной стали тем ниже, чем больше размер и количество аномальных зерен перлита.

Для установления взаимосвязи между величиной коэрцитивной силы H_c — наиболее чувствительным к структуре магнитным параметром и толщиной стенки баллона на всю наружную поверхность баллонов наносилась координатная сетка с шагом 50 мм. В узлах этой сетки провели за-



Рис. 2. Влияние величины углеродного эквивалента на предел текучести

Исследуемый	Заводской номер	Срок службы,	Толщина стенки,	Коэрцитивная	Фактический	Достоверность аппроксимации
баллон	-	лет	MM	сила <i>H</i> _c , А/см	запас прочности	распределения коэрцитивной
			(minmax)	(minmax)	т	силы, $R^2_{\text{прод.}}/R^2_{\text{кольцев.}}$
Б1	91200	45	5,69,0	6,09,4	3,16	0,6989/0,9406
Б2	147710	52	7,39,2	4,36,3	2,98	0,8425/0,9810
Б3	39280	18	8,89,8	5,17,8	2,45	0,8976/0,9390
Б4	269418	36	6,18,9	4,68,3	2,91	0,8716/0,9175
Б5	49607	49	7,48,0	4,76,9	2,50	0,7933/0,8402
Б6	189154	45	7,58,6	5,97,7	Не испытаны	-
Б7	3917	46	8,29,4	4,88,1	"	0,6039/0,9522
Б8	86482	48	7,48,9	4,79,2	''	H/y/0,7431
Б9	153737	56	7,89,6	4,37,1	''	0,9261/0,9525
Б10	89952	48	6,110,3	4,27,7	"	0,9275/0,9275
Б11	2063	57	7,910,3	4,05,2	"	-
Б12	129277	27	7,710,4	5,88,5	''	0,7622/0,8763
Б13	35601	56	7,410,5	4,79,1	''	-
Б14	117769	69	7,09,9	4,88,0	''	0,7216/0,9558

Таблица 2. Химический состав металла исследуемых баллонов, мас. %

Исследуемый баллон	С	Mn	Si	S	Р	Cr	Ni	С _{экв}
Б1	0,513	1,01	0,319	0,023	0,023	0,14	0,11	0,72
Б2	0,467	0,85	0,247	0,023	0,022	0,11	0,07	0,64
Б3	0,490	0,88	0,255	0,019	0,026	0,23	0,10	0,69
Б4	0,442	0,90	0,366	0,014	0,017	0,11	0,11	0,62
Б5	0,482	0,72	0,257	0,026	0,019	0,10	0,08	0,63

Таблица	3. Химическ	кий состав	металла бал	лонов, изго	товленных 1	на ММК им	1. Ильича за	период 20	01-2008 гг.,	мас. %
С	Mn	Si	S	Р	Ni	Cu	Cr	A _{C1}	A _{C3}	Сэкв
0,43	0,74	0,25	0,02	0,011	0,02	0,02	0,03	729,5	810,9	0,56
0,43	0,80	0,29	0,017	0,010	0,02	0,03	0,01	728,5	811,7	0,57
0,43	0,83	0,32	0,016	0,017	0,01	0,01	0,04	729,2	815,0	0,58
0,45	0,80	0,22	0,026	0,021	0,01	0,01	0,01	729,8	811,3	0,59
0,45	0,87	0,27	0,015	0,017	0,02	0,02	0,03	727,0	809,2	0,60
0,47	0,80	0,28	0,018	0,024	0,01	0,01	0,05	729,3	808,1	0,61
0,49	0,73	0,28	0,013	0,023	0,01	0,01	0,04	728,4	801,8	0,62
0,49	0,77	0,30	0,020	0,035	0,01	0,02	0,03	730,2	808,6	0,63
0,50	0,75	0,27	0,022	0,025	0,02	0,03	0,07	730,9	803,4	0,64
0,50	0,84	0,19	0,019	0,017	0,01	0,01	0,03	726,9	798,0	0,65
0,53	0,76	0,26	0,021	0,017	-	-	0,03	729,8	795,6	0,66
0,53	0,77	0,28	0,020	0,019	0,01	0,01	0,04	729,9	796,7	0,67
0,52	0,85	0,23	0,018	0,025	0,02	0,01	0,06	727,6	798,2	0,68

меры толщины оболочки толщиномером ТУЗ-2 и коэрцитивной силы структуроскопом КРМ-Ц-К2М вдоль цилиндра и в кольцевом направлении. Обоснованием измерения магнитных характеристик не менее чем в двух направлениях является, как известно, анизотропия структурных параметров и механических свойств металла оболочек.

Известно, что с увеличением пластической деформации коэрцитивная сила, измеренная вдоль цилиндра, существенно возрастает, а измеренная в кольцевом направлении тоже увеличивается, но меньше, чем в первом случае [5]. Как показано в работе [8], по характеру распределения и величине коэрцитивной силы можно судить о режиме эксплуатации баллонов: надежный (до 7,5 А/см); контролируемый (7,5...9 А/см) и критический (выше 9 А/см), в то время, как в новых баллонах значения коэрцитивной силы составляют $H_c = 4...6$ А/см.

Наши исследования показали, что в баллонах после продолжительной эксплуатации значения коэрцитивной силы преимущественно не превышают контролируемый порог (см. табл. 1). Однако в некоторых баллонах обнаружены локальные участки, отвечающие критическому режиму эксплуатации. Так, в баллоне Б1 при испытании хоть и достигнут высокий запас прочности (m = 3,16, табл. 1), наблюдаются участки (100 см²) с высокими значениями коэрцитивной силы.

Статистический анализ данных, полученных с 480-ти участков каждой цилиндрической оболочки, показал, что распределение коэрцитивной силы в ней можно аппроксимировать полиномом 6-й степени (рис. 3). Величина достоверности составляет $R^2 = 0.6...0.96$ (см. табл. 1). При этом максимальному количеству повторяющихся значений в продольном направлении (рис. 3, *a*, *в*) соответствуют более высокие показатели коэрцитивной силы, чем в кольцевом (рис. 3, *б*, *г*). Таким образом, учитывая, что значения коэрцитивной силы в новых баллонах составляют $H_c = 4...6$ А/см, а в состоянии предразрушения $H_c \ge 9,5$ А/см, полученные результаты свидетельствуют о том, что при отсутствии недопустимых повреждений в стенках баллонов состояние металла после длительного срока эксплуатации в основном продолжает оставаться удовлетворительным.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗЛЕ

Сопоставление данных толщинометрии (рис. 4) и коэрцитивной силы показало, что с уменьшением толщины оболочки коэрцитивная сила увеличивается (рис. 5). Подтверждением установленной закономерности может служить испытание вплоть до разрушения баллона Б1. Несмотря на то, что баллон, как отмечалось, имеет высокий запас прочности, место разрушения было определено до испытания, поскольку в результате измерений обнаружили участок с высокой коэрцитивной силой (9,3...9,4 А/см), которому соответствовала минимальная толщина стенки (5,6...5,9 мм).

Следует отметить, что корреляция между $H_c(y)$ и $\delta(x)$ в основном характеризуется линейной зависимостью типа y = Ax+B, а значения коэрцитивной силы, измеренные в одних и тех же точках вдоль цилиндра и в кольцевом направлении, располагаются эквидистантно. При этом значения, измеренные в продольном направлении, лежат выше значений, измеренных в кольцевом направлении (рис. 5). Однако в ряде случаев линейность нарушается, что, по всей видимости, может быть обусловлено накоплением усталостных повреждений [9, 10], особенностями напряженно-деформированного состояния стенок баллонов, а также структурными изменениями в металле и требует дальнейшего изучения.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами, приведенными в работе [11], где при увеличении деформации (на основании данных оптической металлографии и кристаллографичес-



Рис. 3. Статистический анализ распределения коэрцитивной силы в оболочках баллонов: БЗ (*a*, *b*); Б4 (*b*, *c*); *a*, *b* — продольное; *b*, *c* — кольцевое направление

кой текстуры) установлена линейная корреляция между коэрцитивной силой $H_{\rm c}$ и структурно-текстурными параметрами.

Для развития этих представлений на фрагментах из отобранных пяти баллонов (см. табл. 1) были проведены металлофизические исследования.

Прежде всего представляется целесообразным рассмотреть микроструктуру металла, которая в стенках баллонов Б1, Б2, Б4 и Б5 по существу идентична и представляет собой ферритно-перлитную смесь с баллом зерна феррита № 8 по шкале [12]. При этом с внутренней поверхности сформирована четкая текстура проката, тогда как в середине толщины — слабовыраженная полосчатость и с наружной поверхности — практически равноосная структура (рис. 6, *а*, *в*).

Что касается повреждений, то в Б1 с внутренней поверхности кроме общей коррозии наблю-



Рис. 4. Статистический анализ распределения толщины оболочки δ в баллоне Б9

дается обезуглероженный слой, в котором происходит снижение микротвердости до HV0,1-1810...1930 МПа по сравнению со средним сечением HV0,1-2210...2280 МПа. В меньшей степени подвержена общей коррозии наружная поверхность баллона Б1. Повреждения внутренней поверхности в Б2 более существенны по сравнению с Б1. Кроме того, характерной особенностью здесь является обезуглероживание не только с внутренней, но и с наружной поверхности, где снижение микротвердости происходит ло HV0,1—1470 МПа, по сравнению с серединой толщины — HV0,1—1970...2030 МПа. В Б4 внутренняя и наружная поверхности повреждены об-



Рис. 5. Влияние толщины оболочки δ на H_c в Б9: темные точки — продольное направление, светлые — кольцевое

щей коррозией. В Б5 с внутренней поверхности наиболее значительные повреждения, однако здесь наблюдается повышение микротвердости до HV0,1—2320...2740 МПа. Микроструктура металла стенки баллона БЗ существенно отличается от структуры металла Б1, Б2, Б4 и Б5 и представляет собой крупнозернистую перлитную структуру с тонкими выделениями феррита по границам перлитных зерен, балл зерна № 3...4. На обеих поверхностях стенки имеет место обезуглероживание, более ярко проявившееся на наружной поверхности (рис. 6, б), что, по всей видимости, вызванное высокотемпературным нагревом.

Таким образом, наиболее неблагоприятная микроструктура у металла баллона БЗ — крупное зерно и обезуглероженные слои как с наружной, так и с внутренней поверхности.

Для дальнейшего исследования влияния структурных составляющих на изменение коэрцитивной силы в связи с изменением толщины стенки была определена кристаллографическая текстура металла методом построения обратных полюсных фигур [13, 14]. Измерение интегральных интенсивностей дифракционных рефлексов от кристаллографических плоскостей (110), (200), (211), (220), (310), (222), (321) проводили на образцах из наружного и внутреннего приповерхностного сечения цилиндрической оболочки корпуса после снятия окалины, а также из серединного слоя в сравнении с эталоном, который был приготовлен из мелких рекристаллизованных опилок исследуемой стали. Для удаления деформированного при механической шлифовке слоя осуществляли его химическую полировку на глубину 0,1 мм. Сканирование проводили на дифрактометре ДРОН-3 в одинаковых условиях съемки. Находили отношения интегральных интенсивностей линий дифракции исследуемых образцов и эталона. Приведенная полюсная плотность *P*_{hkl} пропорциональна отношению интенсивности линии в текстурованном образце и образце без текстуры [13, 14]:

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T}{I_{hkl}^o} K.$$

Как показали исследования, текстура металла баллонов в основном представлена семейством плоскостей {110} и {001} (рис. 7), так как их плотность на полюсных фигурах превышает единицу, которая соответствует отсутствию текстуры.

При этом основными компонентами текстуры являются ориентировки {001} <110>, {112} <110> и {110} <001-112>, типичные для текстуры прокатки ОЦК-металлов и сплавов. Следует отме-



Рис. 6. Микроструктура ($\times 200$) металла на наружной поверхности стенки баллонов: a - E1; $\delta - E3$; s - E5



Рис. 7. Распределение кристаллографических плоскостей в разных сечениях стенки корпуса: a — плоскости семейства $\{110\}; \delta$ — $\{001\}; I$ — наружная поверхность; 2 — серединное сечение; 3 — внутренняя поверхность

тить, что кристаллографическая текстура по толщине стенки баллонов неоднородна. Особенно обращает на себя внимание равномерное ступенчатое уменьшение полюсной плотности плоскостей {110} и {001} от внутренней к наружной поверхности стенки в металле баллона Б3. Существенное снижение этих величин со стороны наружной поверхности по сравнению с внутренней свидетельствует о том, что в металле произошли фазовые и структурные изменения, связанные, по-

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2011

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

видимому, с высокотемпературным нагревом наружной поверхности баллона.

Проведенный анализ показал, что между фазовыми превращениями и структурными параметрами, с одной стороны, и кристаллографическим типом текстуры, с другой, существует определенная корреляция. Тем не менее, наличие крупного зерна в Б3 (рис. 6, δ) обусловило, по всей видимости, снижение фактического запаса прочности (см. табл. 1), несмотря на подавление «хрупкой» компоненты (001) с наружной поверхности (см. рис. 7), что требует дальнейших исследований.

Выводы

1. Установлено, что химический состав металла баллонов после длительного срока эксплуатации (45 лет и более) не претерпевает существенных изменений по сравнению с металлом новых баллонов, о чем свидетельствует величина углеродного эквивалента.

2. Показано, что предел текучести металла баллонов $\sigma_{\rm T}$ по существу не зависит от незначительных колебаний в содержании основных легирующих элементов в составе стали Дс.

3. Обнаружено, что структура металла баллонов после длительных сроков эксплуатации представляет собой ферритно-перлитную смесь с баллом зерна феррита № 8, переходящей от структуры проката с внутренней поверхности к практически равноосной структуре с наружной. При этом среди повреждений, кроме общей коррозии, наблюдается обезуглероженный слой, в ряде случаев с обеих поверхностей.

4. Показано, что в результате высокотемпературного нагрева в металле баллона Б3 произошли фазовые превращения, сопровождающиеся ростом зерна, с одной стороны, и изменением кристаллографических параметров, с другой, что обусловило снижение фактического запаса прочности по сравнению с другими баллонами, подвергнутыми испытаниям.

5. Определено, что с увеличением толщины стенки коэрцитивная сила уменьшается, а соотношение между $H_c(y)$ и $\delta(x)$ в основном можно аппроксимировать линейной зависимостью типа y = Ax+B. При этом значения коэрцитивной силы, измеренные в одних и тех же точках вдоль цилиндра и в кольцевом направлении, эквидистантны.

6. Установленная корреляция между толщиной оболочки и коэрцитивной силой открывает перспективу использования коэрцитиметрии для обнаружения опасных зон и повышения безопасной эксплуатации баллонов.

Авторы благодарят: В. В. Усова — д-ра физ.-мат. наук, проф. ЮГПУ им. К. Д. Ушинского МОН Украины и Н. М. Шкатуляк — канд. физ.-мат. наук, доц. ЮГПУ им. К. Д. Ушинского МОН Украины за проведение рентгеноструктурного анализа; Р. И. Дмитриенко — инженера ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ за участие в проведении расчетов по определению коэрцитивной силы.

- Рубан А. Г. Международный опыт обновления газобаллонного парка производителей промышленных газов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 54–63.
- ДНАОП 0.00-1.07–94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (с изменениями и дополнениями).
- 3. ГОСТ 949–73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_p \le 1.9,6$ МПа.
- Чижиченко В. П. Взрывобезопасность кислородных баллонов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 64–65.
- Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. М. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
- Белосточный А. В., Троцан А. И., Коротич И. К. Исследование металла цельнометаллических баллонов для сжатых газов, разрушившихся при эксплуатации // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. 2009. Вип. 19. С. 91–94.
- Белосточный А. В., Лаухин Д. В. Исследование структурных особенностей металла цельнометаллических сосудов, работающих под давлением, с целью стабилизации механических свойств // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научных тр.: Стародубовские чтения, Днепропетровск. — 2005. — Вып. 32. — Ч.1. — С. 133–135.
- Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением / Б. Е. Попов, Е. А. Левин, В. С. Котельников и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 3. — С. 25–30.
- Оценка усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающими магнитными методами для обеспечения качества сварных конструкций и изделий / Л. М. Лобанов, Ю. К. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько, А.Ю. Бондаренко // Докл. 54-й Ежегодной конф. Международного института сварки (Словения), 2001, июль.
- Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Соломаха Р. Н. Коэрцитиметрия делает диагностику достовернее и дешевле // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 3. — С. 59–60.
- Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 10. — С. 19–25.
 ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и
- ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
 Бородкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический
- Бородкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1982. — 272 с.
- Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Ренттенографический и электронно-оптический анализ. — М.: Металлургия, 1970. — 366 с.

Поступила в редакцию 28.11.2010

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 560°С Сообщение 1. Методика и некоторые результаты

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, А. А. ГРУЗД, М. А. ЯРЕМЕНКО, Л. Ф. ХАРЧЕНКО, И. Г. ВОЛОШКЕВИЧ (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы акустико-эмиссионные характеристики широко используемой в промышленности стали 12X18H10T в условиях нормальных и высоких (до 560 °C) температур при испытаниях на статическую прочность. Показаны особенности, характерные для процесса ее деформирования и разрушения, возникновения сопутствующей этому процессу АЭ. Установлено, что модернизированный испытательный стенд, выбранные образцы и методика испытаний обеспечивают получение АЭ характеристик стали 12X18H10T в условиях высокотемпературного нагружения, необходимых для диагностики состояния данного материала.

The acoustic-emission characteristics of steel 12Kh18N10T widely used in industry under the conditions of normal and high (up to 560 °C) temperatures during static strength tests were investigated. The peculiarities are shown peculiar for the process of its deformation and fracture, formation of AE followed this process. It was established, that modified test stand, selected specimens and test methods provide obtaining AE characteristics of steel 12Kh18N10T under conditions of high-temperature loading necessary for diagnostics of state of the given material.

Учитывая широкое распространение в нефтехимических производствах и энергетике металлоконструкций и сложного технологического оборудования, работающих при высоких температурах (до 560 °C) и при этом малодоступных для применения традиционных средств неразрушающего контроля, разработка средств акустико-эмиссионного (АЭ) их диагностирования представляет чрезвычайно важную задачу [1].

Высокие температуры оказывают существенное влияние на прочностные свойства и эксплуатационные характеристики конструкционных сталей [2–4]. Исследование в лабораторных условиях АЭ характеристик наиболее часто применяемых в условиях высоких температур материалов является необходимым этапом при переходе к периодическому АЭ контролю, а затем и непрерывному АЭ мониторингу потенциально опасных объектов промышленности, в первую очередь химических производств, где температуры могут изменяться в диапазоне от криогенных до весьма высоких. Результаты высокотемпературных испытаний могут также быть полезны при АЭ исследованиях процессов сварки и плавки.

В качестве модельного материала, широко используемого в конструкциях предполагаемых объектов контроля, в данной работе изучена сталь 12X18H10T, проведены ее испытания на статическую прочность в условиях нормальных и высоких температур с целью определения особенностей возникновения сопутствующей этому процессу акустической эмиссии.

Сталь 12X18H10T — коррозионно-стойкая конструкционная сталь аустенитного класса. Приведем некоторые ее характеристики и особенности (по данным источника [5]). Назначение: изготовление деталей, выдерживающих температуры до 600 °C, сварных аппаратов и сосудов для разбавленных растворов азотной, уксусной, фосфорной кислот, растворов щелочей и солей, других деталей, работающих под давлением при температурах от -196 до +600 °C, а при наличии агрессивных сред — до +350 °С. Продукция из стали 12Х18Н10Т используется в строительной, пищевой промышленности, в медицинском оборудовании. Бесшовные трубы из стали 12Х18Н10Т широко применяются в нефтехимической отрасли, автомобилестроении, машиностроении и прочих областях промышленности. Сталь используют и в криогенной технике для изготовления сварных конструкций, работающих при температурах до -269 °C, и при изготовлении высокотемпературного емкостного, теплообменного и реакционного оборудования, в том числе паронагревателей и трубопроводов высокого давления с температурой эксплуатации до 600 °С, для деталей печной аппаратуры, муфелей, коллекторов выхлопных систем. Максимальная температура применения жаростойких изделий из этих сталей в течение 10000 ч составляет 800 °C, температура начала интенсивного окалинообразования — 850 °C. При непрерывной работе сталь устойчива против окисления на воздухе, в атмосфере продуктов сгорания топлива при температурах до 900 °C, в условиях резких изменений температур до 800 °С.

© Недосека А. Я., Недосека С. А., Грузд А. А., Яременко М. А., Харченко Л. Ф., Волошкевич И. Г., 2011

🔙 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

Химический состав стали 12Х18Н10Т следующий, мас. %: не более 0,8 Si; не более 0, 30 Cu; не более 2,0 Mn, 9,0...11,0 Ni; 0,6...0,8 Ti; не более 0,035 P; 17,0...19,0 Cr; не более 0,020 S.

Механические свойства стали 12Х18Н10Т (состояние поставки — прутки сечением 60 мм, термообработка — закалка при 1020...1100 °С, воздух, масло или вода): $\sigma_{0,2} = 196$ МПа; $\sigma_{\rm B} = 510$ МПа; $\delta_5 = 40\%$; $\psi = 55\%$. Механические характеристики при высоких температурах приведены в табл. 1.

После стандартной термической обработки, состоящей из закалки с 1050 °С с охлаждением в воде, сталь имеет структуру раствора. Она не претерпевает каких-либо превращений при нагреве под горячую пластическую деформацию и при охлаждении до –196 °С. При длительных выдержках в интервале 450...650 °С наблюдается выделение карбидов хрома типа Cr23C6, что вызывает появление склонности к межкристаллитной коррозии с минимальным инкубационным периодом 8....10 ч при 600 °С (испытание в кипящей 65%-ной азотной кислоте, три цикла по 48 ч).

Хром, содержание которого в стали составляет 17...19 %, представляет собой основной элемент, обеспечивающий способность металла к пассивации и обеспечивающий ее высокую коррозионную стойкость. Легирование никелем при достаточном его количестве (8..12 %) приводит к образованию стали с аустенитной структурой, т.е. переводит сталь в аустенитный класс, что имеея принципиально важное значение, так как позволяет сочетать высокую технологичность стали с уникальным комплексом эксплуатацинных характеристик. Такие стали имеют повышенную (по сравнению с ферритными) коррозионную стойкость в агрессивных средах, в том числе в серной и ряде других кислот. Они хорошо прокатываются в горячем и холодном состояниях, свариваются без охрупчивания околошовных зон. Влияние никеля на коррозионную стойкость в стали этого класса проявляется в том, что он, имея повышенное сопротивление действию кислот, передает это свойство стали.

Таким образом, проводимое исследование актуально как ввиду широкого применения данного

Таблица 1. Механические свойства стали 12X18H10Т при повышенных температурах

<i>Т</i> исп., °С	σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	δ5, %	ψ, %	КСU, Дж/м ²
20	225315	550650	4674	6680	215372
500	135205	390440	3042	6070	196353
550	135205	380450	3141	6168	215353
600	120205	340410	2838	5174	196358
650	120195	270390	2737	5273	245353
700	120195	265360	2038	4070	255353

материала в промышленности, так и его высоких эксплуатационных качеств.

Представленному в работе исследованию предшествовали разработки:

 – специализированного испытательного и контрольного оборудования для получения и исследования высокотемпературных АЭ характеристик конструкционных материалов;

– методики проведения высокотемпературных АЭ испытаний образцов стали 12X18H10T.

Методика исследования предусматривала отработку и изготовление специализированных образцов, предназначенных для нагрева, статическое растяжение их вплоть до момента разрушения, измерение и запись акустических характеристик исследуемого материала.

Разработано и изготовлено испытательное оборудование: печь с электронагревом до температур 560...600 °C и теплоизоляцией, захваты-переходники, адаптированные к разрывной машине P-20.

Система получения акустических характеристик испытуемого материала представляет собой:

 акустические датчики-преобразователи типа ДАЭ-150;

 волноводы, рассчитанные для понижения рабочих температур в диапазоне от 120 °С на захвате разрывной машине до 25 °С на преобразователе АЭ;

– контрольно-диагностический комплекс на базе системы АЭ диагностики ЕМА-3.

Система получения, записи и обработки данных по испытательным температурам $T_{\rm исп}$ °С и испытательным нагрузкам $P_{\rm исп}$ включает:

контролирующие термопары типа ТП 0188
 с диапазоном измеряемых температур от -140
 до +1000 °C;

– потенциометр с рабочим диапазоном
 0...+5 В, контролирующий уровень нагрузки на испытуемый образец;

– АЭ комплекс ЕМА-3.

Таким образом, обеспечен комплексный и синхронный контроль параметров, необходимых для получения и анализа высокотемпературных АЭ характеристик испытуемого материала.

Проведенное ранее исследование [3] показало, что в диапазоне нагрева до 350 °С акустические характеристики сталей остаются практически неизменными, затем происходит уменьшение амплитуд принятых датчиками сигналов и снижение скорости прохождения волны через материал. Скорость определяли по задержкам времени прихода АЭ на установленные на объекте контроля датчики, учитывая, что известно расстояние между ними.

Предварительно была решена задача по отработке формы и геометрических размеров образцов материала 12Х18Н10Т с целью оптимизации уровня затухания получаемых АЭ сигналов. Обеспечению условий эксперимента и поставленным задачам исследования удовлетворяет образец цилиндрической формы с концентратором напряжений в средней части — надрезом размером $1,0\times2,5$ мм (рис. 1), обеспечивающим сравнительно невысокий уровень затухания сигналов АЭ — амплитуда A не более 9...12 дБ.

Схема стенда для высокотемпературных АЭ испытаний конструкционных материалов представлена на рис. 2.

При испытаниях на статическое растяжение регистрировали температуру в рабочей части образца, нагрузку и акустическую эмиссию, а также проверяли алгоритм прогноза разрушающей нагрузки АЭ системы ЕМА-3 в условиях различной акустической активности.

Принятая в испытаниях схема использования электропечи с теплоизоляцией обеспечила равномерное прогревание и поддержание постоянной температуры по всему периметру испытуемого образца материала, а встроенные в печи термопары позволяют контролировать и обеспечивать постоянную температуру. С учетом эксплуатационных свойств материала 12Х18Н10Т при нагружении поддерживалась постоянная температура 560 °С с внесением ее величины в систему контроля.

Поддержание параметров нагружения разрывной машиной Р-20: нагрузка $P_{\rm исп}$ (0...10000 кгс) и ско-



Рис. 1. Круглый образец с головкой диаметром 14 мм и надрезом-концентратором в рабочей части

рость нагружения V_{исп} (≈1000 кгс/мин) также осуществлялось системой контроля.

В выбранной схеме испытаний особое внимание уделялось разработке и расчету применяемых волноводов [6, 7], обеспечивающих качественную передачу получаемых АЭ характеристик и низкий уровень затухания сигналов АЭ — не более 3...5 дБ. В качестве волновода использовали цилиндрический стержень из стали Ст3 диаметром 16 мм длинной 176 мм с винтовой нарезкой на коцах — для крепления волновода к захватной части системы нагружения (длинной 27 мм) и для присоединения датчика АЭ (14 мм). Между датчиком и головкой волновода расположен тонкий слой акустопрозрачного материала для обеспечения надежной передачи сигналов. Расчет уменьшения температуры от нагреваемого торца до рабочей поверхности проводили по формуле:

$$T = T_{\rm cp} + T_{\rm Hay} \exp\left(-z\sqrt{\frac{b}{a}}\right), \ b = \frac{2\alpha a}{\lambda_0 r_c}, \ a = \frac{\lambda_0}{c\gamma}$$

где $T_{\rm cp} = 20$ °С — температура окружающей среды на момент проведения измерения; $T_{\rm нач}$ — начальная температура; α — коэффициент теплоотдачи; γ — удельный вес; c — удельная теплоемкость; λ_0 — коэффициент теплопроводности; $r_{\rm c}$ — радиус стержня; z — расстояние по длине волновода от переходника до датчика (100 мм).

Теплофизические постоянные для материала волновода выбирали из справочных материалов. Проведенные исследования показали, что при сделанном выборе геометрических размеров, формы и материала волноводов практически не уменьшается чувствительность датчиков АЭ в рабочем диапазоне частот, применение волноводов не оказывает существенного влияния на форму и амплитуду принимаемого сигнала.

Основные результаты проведенного исследования. На основании статистического анализа испытаний образцов из данного материала, учитывая его низкую акустическую активность, оценим, как влияет наличие концентраторов на повышение информативности метода АЭ. Данные табл. 2 четко показывают, что наличие надреза или сварного шва в материале обеспечивает в отличие от образцов без концентратора получение достаточно большого числа событий АЭ (рис. 3)

Таблица 2. Снижение среднего числа событий АЭ при высоких температурах

Материал	Число событий АЭ			
	при нормальной температуре	при температуре 560 °C		
Без шва	12	3		
Со сварным швом	240	70		
С надрезом	154	48		



Рис. 2. Стенд для высокотемпературных испытаний образцов на основе машины P-20 (*a*) и фрагмент установки с образцом круглого сечения в электропечи (б): *1* — система нагружения образца машины P-20; *2* — верхняя и нижняя траверсы; *3* — высокотемпературная печь; *4* — переходник для составного захвата; *5* — датчик АЭ; *6* — волновод; *7* — термопара

даже при общем снижении АЭ активности в условиях высоких температур [3].

Поскольку образцы с надрезом менее АЭ активны по сравнеию с образцами со сварным швом, наибольший интерес представляло исследование возможностей оценки именно их характеристик. Испытания показали, что с использованием принятой методики исследований может быть получено достаточно большое число событий АЭ, а определение их координат и кластерный анализ работают эффективно (рис. 3).

На рис. 4–6 представлены диаграммы испытаний образцов с зависимостью АЭ параметров от времени:

– рис. 4, а; 5, а, в; 6, а: синего цвета — столбчатый график амплитуд событий АЭ (А, дБ), красного — график нагрузки (Р, кг), зеленого — график среднего уровня непрерывной АЭ (Аv, мВ), фиолетового — график суммарного числа событий АЭ (N, безразмерный);

– рис. 4, б; 5, б, г; 6, б: синего цвета — ступенчатый график амплитуд событий АЭ (А, дБ), красного — график нагрузки (Р, кг), зеленого — ступенчатый график времени нарастания сигнала до максимума (*R*, мкс), фиолетового — ступенчатый график числа осцилляций (*C*, безразмерный).

В нижней части графика указан параметр, откладываемый по оси абсцисс, и его размерность (в данном случае время, прошедшее от начала испытания).

Результаты испытания, приведенные на рис. 4, показывают крайне незначительную активность АЭ на протяжении всего процесса нагружения, хотя на стадии развития трещины зафиксированы пять событий АЭ из общего числа, равного восьми. Учитывая требования, предъявляемые системами семейства ЕМА к распознаванию процесса накопления повреждений, такого объема данных для прогнозирования развития разрушения по данным АЭ недостаточно. Тем не менее, отметим некоторые очевидные закономерности. Процесс накопления повреждений в данном случае происходит дискретно [8], но эта дискретность проявляется фактически через одинаковые интервалы времени. Каждый такой скачок поврежденности материала сопровождается ростом амплитуды АЭ

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

сигналов, увеличением числа осцилляций и времени нарастания сигнала.

В целом такая картина характерна для материалов с изначально низкой поврежденностью. Следует также отметить незначительные колебания непрерывной АЭ. Всплеск ее наблюдается только при возникновении первого события АЭ, соответствующего, вероятнее всего, началу развития пластической деформации в материале.

Разрушение образца визуально происходило плавно, слышимый при разрыве образца звук был негромким, что практически полностью соответствует невысокому уровню амплитуд АЭ сигналов при разрушении в сравнении с амплитудами, регистрируемыми в процессе нагружения. Контроль АЭ системой стали 12Х18Н10Т требует особых методических подходов, поскольку при отсутствии концентраторов или накопленных в процессе эксплуатации дефектов такой материал является одним из наименее акустически активных материалов.

Испытание образцов с концентратором-выточкой (рис. 5), показывает наличие достаточно большого по сравнению с гладким образцом числа событий АЭ. В то же время картина распределения сигналов во времени и их численные характеристики для двух представленных образцов существенно отличаются. Наиболее важным является отличие АЭ картины в момент разрушения. Для образца № 1 характерным является сохранение в период развития трещины и при разрушении величин амплитуд сигналов A, числа осцилляций C и времени



Рис. 3. Окно программы ЕМА-3.5. Испытание образца при температуре 560 °С. Левый большой экран — область отображения координат событий АЭ и их кластеризации. Над ним — экран прогноза разрушения и предупреждения об опасности. Правый экран — графики реального времени с различными параметрами процесса испытаний



Рис. 4. Результаты испытаний образца без концентратора при нормальной температуре (+20 °C)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2011





Рис. 5. Результаты испытаний двух образцов с концентратором при температуре 560-°С: а, б — образец № 1; в, г -– № 2

Рис. 6. Результаты испытаний образца со сварным швом при температуре 450 °С

нарастания сигнала до максимума *R* примерно в том же диапазоне, в котором они находились в процессе всего нагружения.

Для образца № 2, напротив, при в целом меньшей АЭ активности при разрушении наблюдается существенный рост упомянутых выше характеристик. Так, амплитуда в процессе нагружения меняется в диапазоне 17...36 дБ, а при разрушении достигает 68 дБ, число осцилляций — соответственно 1...16 и 619, время нарастания до максимума — 1...29 и 582 мкс. Это очень существенные изменения, которые свидетельствуют о том, что для образца № 2 процесс образования и роста трещины происходит более динамично, с выделением большей энергии. Таким образом, единая картина разрушения одинаковых образцов из стали 12Х18Н10Т в условиях высокотемпературного нагружения отсутствует.

Испытание сварного образца (рис. 6) по кинетике возникновения сигналов АЭ и их изменения в процессе нагружения наиболее соответствует образцу с надрезом № 2, представленному на рис. 5. Также наблюдается существенный рост амплитуд сигналов А, числа осцилляций С и времени нарастания сигнала до максимума R при переходе к развитию трещины и разрушению. Отличие состоит в том, что периодически возникают достаточно мощные сигналы и всплески непрерывной АЭ еще на ранних стадиях нагружения. Это можно предварительно объяснить наличием в образце остаточных сварочных напряжений и повреждений, внесенных процессом сварки, которые приводят к более раннему началу развития разрушения, формированию зон локализации пластических деформаций и образования пор [9].

Приведенные результаты свидетельствуют о достаточно высокой информативности метода в условиях высоких температур при условии наличия концентраторов напряжений, в качестве которых в проведенных экспериментах выступали надрезы в центральной части образца и сварные соединения.

Учитывая, что в данной серии испытаний, в отличие от приведенных в работах [2, 3], был обеспечен равномерный нагрев рабочей части образцов, результаты имеют ряд отличий. Их детальное изучение — предмет дальнейшего исследования. Тем не менее, следует отметить важность такой работы, поскольку здесь приведены данные типовых лабораторных исследований с равномерным нагревом рабочей части образцов, в упомянутых же выше статьях исследования проведены при неравномерном нагреве рабочей части, что соответствует условиям, приближенным к промышленным. Установление природы этих отличий и их описание является серьезным шагом к последующему промышленному применению систем АЭ мониторинга на высокотемпературных объектах контроля с эффективной оценкой их состояния.

Выводы

Модернизированный испытательный стенд, выбранные образцы и волноводы, а также методика

испытаний обеспечивают получение АЭ характеристик стали 12Х18Н10Т в условиях высокотемпературного нагружения, необходимых для диагностики данного материала.

Состояние объектов из стали 12Х18Н10Т, работающих при высоких температурах (до 560 °С), может быть оценено при помощи метода АЭ. Это касается как определения координат развивающихся дефектов, так и отслеживания по данным АЭ процесса накопления повреждений в материале в процессе его нагружения.

При высоких температурах использование специальных волноводов, снижающих температуру рабочего участка датчиков, решает проблему обеспечения процедуры АЭ контроля.

Количественные параметры сигналов АЭ, регистрируемые для разных образцов в аналогичных температурно-силовых условиях нагружения, существенно отличаются и не могут быть однозначно истолкованы при описании процесса накопления повреждений и разрушения.

Перспективным представляется исследование и установление различий акустических свойств конструкционных материалов при высоких температурах в условиях равномерного и неравномерного нагрева.

- 1. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 2. — С. 7–17.
- 2. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека, и др. // Там же. 2009. № 1. С. 5–10.
- 3. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2 / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. — 2009. — № 4. — С. 5–13.
- 4. Особенности функционирования технологических трубопроводов при высоких температурах / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
- Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А. Зубченко. — Изд. 2-е. — М.: Машиностроение, 2003. — 784 с.
- 6. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностика сварных конструкций. Киев: Индпром, 2008. 815 с.
- Оптимизация акустико-электронного тракта при применении волноводов / А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2007. № 1. С. 14–17.
- Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов // Там же. — 2009. — № 3. — С. 11–17.
- 9. *Недосека С. А.* Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. 2007. № 2. С. 3–9.

Поступила в редакцию 30.11.2010

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СТЕРЖНЯ В ПРОДОЛЬНОМ ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В. Ф. МАТЮК, А. А. ОСИПОВ, А. В. СТРЕЛЮХИН (Гос. науч. учреждение «Ин-т прикл. физики НАН Беларуси»)

Предложена методика численного расчета магнитного состояния сплошного ферромагнитного стержня круглого сечения, находящегося в однородном постоянном магнитном поле, основанная на использовании метода пространственных интегральных уравнений. При построении модели учтена зависимость магнитных характеристик материала от величины внешнего намагничивающего поля. Приведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Проведен анализ распределения намагниченности, внутреннего поля, восприимчивости и коэффициента размагничивания вдоль продольной оси стержня.

The technique of numerical calculation of a magnetic condition of a continuous ferro- magnetic core of the round section which is in a homogeneous constant magnetic field, based on use of a method of the spatial integral equations is offered. At model construction dependence of magnetic characteristics of a material on size of an external magnetizing field is considered. Comparison of results of calculation with experimental data is resulted. The analysis of distribu- tion of magnetization, an internal field, a susceptibility and demagnetizing factor along a longitudinal axis of a core is carried out.

Многие изделия машиностроения имеют форму стержней круглого сечения. При НК контроле их структурного состояния магнитными методами часто применяется намагничивание постоянным магнитным полем в разомкнутой магнитной цепи [1]. При разработке новых магнитных методов НК таких изделий, а также при расчете и проектировании устройств для их реализации необходимо знать магнитное состояние изделий в зависимости от магнитных свойств используемого материала, размеров и величины приложенного поля.

Наличие нелинейной зависимости между напряженностью внешнего поля и магнитными характеристиками материала, сложный характер перераспределения намагниченности в реальных объектах, зависящий от размеров изделия, свойств его материала и от величины внешнего поля не позволяют решать задачи такого класса аналитически. Эти трудности преодолеваются путем численного моделирования задачи, причем применяемая модель должна по возможности наиболее точно описывать характер происходящих процессов [2].

В работе [3] на основе анализа многочисленных экспериментальных данных предложено аналитическое выражение, позволяющее получить распределение интегральной величины намагниченности вдоль продольной оси сплошного стержня круглого сечения относительно ее значения в центральном сечении с учетом размеров стержня и зависимости магнитных свойств материала от величины намагничивающего поля. Однако это выражение не позволяет рассчитать распределение намагниченности и магнитной индукции внутри стержня, а также в любой области вне его. Кроме того, во многих случаях представляют интерес абсолютные значения данных величин.

Расчет любой магнитной системы строится на основе формальных источников поля, анализируемых на макроскопическом уровне. Сам расчет обычно разделяется на два этапа, заключающиеся в последовательном решении следующих задач: определение неизвестных источников поля и определение создаваемых ими полей вне магнитной системы. Основную сложность при решении представляет именно первый этап, так как выбранная модель должна адекватно описывать исходную задачу и обеспечивать минимальное расхождение расчета и эксперимента. Важным моментом также является задание магнитных характеристик материала объекта, что существенно влияет на точность расчета. Объективную оценку модели дает сопоставление результатов расчета по ней с экспериментом в тех областях, в которых можно провести измерения.

В качестве объекта исследований в настоящей работе рассматривается сплошной ферромагнитный стержень круглого сечения, находящийся в однородном постоянном магнитном поле. Его можно использовать как модель многих реальных объектов.

В настоящей работе изложена методика численного расчета магнитного состояния сплошного ферромагнитного стержня круглого сечения, находящегося в однородном постоянном магнитном поле.

Методика расчета. В основу методики положен метод пространственных интегральных уравнений, который основан на общем интегральном выражении напряженности поля или магнитной индукции через намагниченность элементов маг-

[©] В. Ф. Матюк, А. А. Осипов, А. В. Стрелюхин, 2011

нитной системы [2]. Особенностью этого метода является то, что он не требует для решения задачи задания граничных условий. При этом область расчета ограничена только объемом ферромагнетика. Еще одним достоинством данного метода является простота ввода в задачу магнитных характеристик материала стержня.

Для магнитной системы, состоящей из ферромагнитного образца и источника магнитного поля, результирующее поле в любой точке наблюдения *Q* представляет собой векторную сумму полей, создаваемую этим источником и самим ферромагнетиком [2]:

$$H(Q) = -\frac{1}{4\pi} \operatorname{grad}_{Q} \int_{V_{m}} \overrightarrow{M}(P) \operatorname{grad}_{P} \left(\frac{1}{|r_{PQ}|}\right) dV_{P} + (1) + H^{\operatorname{BII}}(Q),$$

$$\overrightarrow{B}(Q) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \left(\int_{V_{M}} \frac{\left[\left[\nabla \times \overrightarrow{M}(P)\right] \times r_{PQ}\right]}{|r_{PQ}|^{3}} dV_{P} - (2) - \int_{S_{12}} \frac{\left[\left[\overrightarrow{n} \times \overrightarrow{M}(P)\right] \times r_{PQ}\right]}{|r_{PQ}|^{3}} dS_{P} + B^{\operatorname{BII}}(Q),$$

где P — точка источника поля; Q — точка наблюдения; $\overrightarrow{H(Q)}$, $\overrightarrow{B}(Q)$ — соответственно вектор напряженности и вектор магнитной индукции в точке Q; $\overrightarrow{M}(P)$ — вектор намагниченности материала в точке P; V_M , S_M — соответственно объем ферромагнетика и площадь его поверхности; \overrightarrow{n} внешняя нормаль к поверхности S в точке интегрирования; $\overrightarrow{r_{PQ}}$ — радиус-вектор из точки источника P в точку наблюдения Q; $\overrightarrow{H}^{BIII}$ и $\overrightarrow{B}^{BIII}$ — соответственно вектор напряженности и вектор индукции магнитного поля, создаваемого внешним источником.

Отличие выражений (1) и (2) заключается в том, что если в (1) рассматриваются объемные и поверхностные заряды, то в (2) — объемные и поверхностные токи. Для расчета можно использовать любое из приведенных выше уравнений, выбор при этом определяется только вычислительными затратами. В работе [4] показано, что при решении задач с цилиндрической симметрией с точки зрения уменьшения количества вычислений и сокращении времени счета рациональнее использовать выражение (2), так как в рамках выбранной модели будут содержаться только поверхностные интегралы. Рассматриваемая в статье магнитная система имеет цилиндрическую симметрию, поэтому в дальнейшем решение проводилось с использованием выражения (2).

Полагаем, что материал стержня является изотропным, а между составляющими M_v и H_v — соответственно вектора намагниченности и вектора напряженности магнитного поля справедливо соотношение:

$$H_{\rm H} = \frac{M_{\rm H}}{\chi \left(|H|\right)},\tag{3}$$

где $|\overrightarrow{H}|$ — модуль напряженности магнитного по-

ля в рассматриваемой точке; $\chi(|\acute{H}|)$ — магнитная восприимчивость материала стержня.

С учетом этого допущения для точек внутри стержня выражение (2) можно представить в виде нелинейного интегрально-дифференциального уравнения относительно намагниченности:

$$\mu_{0}(1 + \frac{1}{\chi(|H|)}) \overrightarrow{M}(Q) =$$

$$-\frac{\mu_{0}}{4\pi} \int_{S_{M}} \frac{[\overrightarrow{[n M}(P)] \overrightarrow{r_{PQ}}]}{|r_{PQ}|^{3}} dS_{P} + \overrightarrow{B}^{\text{BIII}}(Q) ,$$

$$(4)$$

а для точек вне стержня:

_

$$\mu_0 \overrightarrow{H}(Q) =$$

$$= -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S_M} \frac{[\overrightarrow{n M}(P)]\overrightarrow{r}_{PQ}]}{|r_{PQ}|^3} dS_P + B^{\text{BIII}}(Q) .$$
(5)

Введением дискретной математической модели ферромагнитного стержня разобъем его объем на некоторое количество элементарных объемов (рис. 1). В силу цилиндрической симметрии задачи в качестве таких элементов выбраны кольца, оси которых совпадают с осью стержня, а в ка-



Рис. 1. Взаимное расположение элемента источника Р и точки наблюдения Q

К НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

честве системы координат — цилиндрическая система. Для описания распределения источников магнитного поля в стержне использовалась кусочно-постоянная аппроксимация вектора намагниченности по элементам разбиения. При этом допущении полагаем, что в каждом из них выполняется условие:

$$M_{zp} = \text{const}; M_{rp} = \text{const},$$
 (6)

где p = 1, 2, ..., K — номер элементарного объема; K — общее число элементов разбиения.

Заменяя интегрирование в (4) и (5) суммированием по элементам разбиения, выражения для компонент входящих в него векторов представим в виде:

$$B_{z}(Q) = \begin{cases} \mu_{0} \left(1 + \frac{1}{\chi(|H|)}\right) M_{z} \\ \mu_{0} H_{z} \end{cases} =$$
(7)
$$= \mu_{0} \sum_{p=1}^{K} \left[M_{zp} Z_{1}^{p} + M_{rp} Z_{2}^{p}\right] + \mu_{0} H_{z}^{BII}(Q) ,$$
$$\left[\mu_{0} \left(1 + \frac{1}{M}\right) M\right]$$

$$B_{r}(Q) = \begin{cases} \mu_{0} (1 + \frac{1}{\chi(|H|)})M_{r} \\ \mu_{0} H_{r} \end{cases} =$$

$$K \qquad (8)$$

$$= \mu_0 \sum_{p=1} \, [M_{zp} \, Z_1^p + M_{rp} \, Z_2^p \,] + \mu_0 \, H_r^{\rm BII}(Q) \; , \label{eq:poly}$$

где Z_1^p , Z_2^p , R_1^p , R_2^p — геометрические коэффициенты, выражения для которых приведены в работе [4].

Последовательно помещая точку наблюдения *Q* в центры сечения каждого из элементов разбиения, для *k*-го элемента можно записать систему уравнений, включающую собственную намагниченность этого элемента и суммарную напряженность магнитного поля внешних по отношению к нему источников. В матричном виде эта система имеет вид:

$$(\mathbf{D} - \mathbf{A}_{\mathbf{G}}) \overrightarrow{\mathbf{M}} = \mathbf{H}_{VN}, \qquad (9)$$

где A_G — прямоугольная матрица геометрических коэффициентов размерностью 2×2; **D** — прямоугольная матрица размерностью 2×2, составленная из коэффициентов 1/ χ_k , помещенных на главную диагональ матрицы (остальные элементы нули); χ_k — магнитная восприимчивость *k*-го элемента; $\overrightarrow{\mathbf{M}}$ — матрица искомых значений компонент намагниченности; $\overrightarrow{\mathbf{H}}_{VN}$ — матрица, состоящая из компонент напряженности поля, созданного всеми внешними по отношению к *k*-у элементарному объему источниками;

$$\mathbf{D} - \mathbf{A}_{\mathbf{G}} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{1}{\chi_{k}} - Z_{1}^{kk} & -Z_{2}^{kk} \\ -R_{1}^{kk} & 1 + \frac{1}{\chi_{k}} - R_{2}^{kk} \end{pmatrix};$$
(10)
$$\overrightarrow{\mathbf{M}} = \begin{pmatrix} M_{zk} \\ M_{rk} \end{pmatrix};$$
(11)
$$\overrightarrow{\mathbf{H}}_{VN} = \begin{pmatrix} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^{K} (M_{zp} \ R_{1}^{pk} + M_{rp} \ R_{2}^{pk}) + H_{zk}^{BII} \\ \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^{K} (M_{zp} \ R_{1}^{pk} + M_{rp} \ R_{2}^{pk}) + H_{rk}^{BII} \end{pmatrix}.$$
(12)

Так как истинное распределение намагниченности в стержне неизвестно, то решение системы уравнений (9) находится методом итераций. За начальное приближение этого решения в каждом элементе разбиения принимается величина намагниченности, определенная по значениям поля внешнего источника в этом элементе. Подставив полученные таким образом значения намагниченности в систему уравнений (9), получаем приближение величины намагниченности для каждого элемента разбиения. Определенные таким образом значения намагниченности принимаются за новое приближение для расчета. Решение считается найденным, когда для каждого элемента разбиения стержня при сравнении модуля вектора намагниченности на двух соседних итерациях (і и i+1) достигается заданная точность ε :

$$\left. \frac{M_k^{i+1} - M_k^i}{M_k^{i+1}} \right| \le \varepsilon \,. \tag{13}$$

По рассчитанным значениям компонент вектора намагниченности в стержне, используя (4), можно определить распределение компонент вектора магнитной индукции и, соответственно, напряженности магнитного поля внутри стержня. По выражению (5) аналогичные распределения можно получить и в любой области вне стержня.

Выше отмечалось, что точность расчета зависит от корректности ввода в задачу магнитных характеристик материала изделия. Связь между любыми двумя векторами, характеризующими магнитное

поле в ферромагнетике $(\overrightarrow{B}, \overrightarrow{M} u \overrightarrow{H})$ задается на основе аппроксимирующих выражений или путем введения в задачу экспериментально измеренных магнитных характеристик материала.

Для определения входящей в (10) величины χ_k для каждого элемента и на каждой итерации воспользуемся выражением для намагниченности [5]:

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕ

$$\chi_k = \frac{M_k}{H_k},\tag{14}$$

где
$$M_k = \frac{M_s k_{ts} (H_k) H_k^2 / p + k_1 k_3 (H_k) H_{cs}^2}{H_k^2 + k_2 H_k^{3/2} H_{cs}^{1/2} + k_1 H_{cs}^2} \times \left(\operatorname{arctg} \frac{H_{cs} + H_k}{H_0'} - \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} - H_k}{H_0'} \right),$$
 (15)

M_s, *H_{cs}* — намагниченность насыщения и коэрцитивная сила материала стержня; H_0' , $k_{ts}(H_k)$, k_1 , $k_2, k_3(H_k)$ — параметры, определяемые по методике, приведенной в работе [5].

Сравнение с экспериментом. Данная методика экспериментально проверена на ферромагнитных стержнях из существенно отличающихся по коэрцитивной силе материалов с относительной длиной λ (*L*, *R* — соответственно длина и радиус стержня, $\lambda = L/(2R)$), изменяющейся в диапазоне от 2 до 20. Намагничивание осуществляли постоянным магнитным полем $H_z^{\text{вш}}$, имеющим только компоненту z, величина которого изменялась от 500 до 40000 А/м.

Магнитные характеристики материала стержня измерили на установке УИМХ с использованием кольцевых образцов из этого же материала [6] и применили их при расчете:

применили их при расчете: материал 1: $H_{cs} = 150$ A/м, $M_s = 1,7\cdot10^6$ A/м, $\chi_{\rm H} = 200, M_{rs} = 5,2\cdot10^5$ A/м, $H_{ms} = 34000$ A/м; материал 2: $H_{cs} = 724$ A/м, $M_s = 1,54\cdot10^6$ A/м, $\chi_{\rm H} = 82, M_{rs} = 7,18\cdot10^5$ A/м, $H_{ms} = 34000$ A/м; материал 3: $H_{cs} = 3120$ A/м, $M_s = 1,6\cdot10^6$ A/м, $\chi_{\rm H} = 70, M_{rs} = 6,0\cdot10^5$ A/м, $H_{ms} = 34000$ A/м. Основные кривые намагничивания этих мате-

риалов приведены на рис. 2.

Проверку методики проводили посредством сравнения величины магнитной индукции и ее распределения вдоль продольной оси стержня разных размеров, рассчитанной по данной методике и измеренной на установке УИМХ. При этом измерительная катушка имела длину 2 мм и могла передвигаться вдоль продольной оси z стержня.

На рис. 3 представлены результаты расчета продольной составляющей вектора магнитной индукции В_г и эксперимента для отдельных случаев (*z/L* — относительная координата).

Из представленных результатов видно, что предложенная методика расчета дает хорошо согласующиеся с экспериментальными данными результаты и может быть использована для расчета магнитного состояния данного типа объектов.

Небольшое расхождение, наблюдающееся при сравнении, объясняется как допущениями при построении модели, так и приближенным характером аппроксимирующего выражения и ограни-



Рис. 2. Основные кривые намагничивания материалов: $1 - H_{cs} = 150; 2 - 724; 3 - 3120 \text{ A/m}$

ченной точностью задания магнитных характеристик материала.

Анализ магнитного состояния ферромагнитного стержня. Предложенная методика может быть использована для расчета и анализа характера распределения намагниченности, внутреннего поля и магнитной восприимчивости в стержне круглого сечения.

На рис. 4-7 приведены распределения этих величин вдоль оси стержня в двух областях: ближней к оси стержня (внутренний слой) и дальней (внешний слой) в зависимости от относительной длины λ , величины внешнего поля и магнитных характеристик материала стержня.

Из представленных зависимостей видно, что в слабом магнитном поле ($H_z^{BIII} = 2000 \text{A/M}$) в коротком стержне ($\lambda = 2$) сильнее намагничивается внешний слой (см. рис. 4), причем наибольшее различие наблюдается ближе к краю образца. Такое распределение намагниченности в рассматриваемых областях связано с величиной размагничивающего поля в них, которое определяется, в основном, его относительными размерами и областью наблюдения. Это поле имеет большую абсолютную величину во внутренней области стержня, чем во внешней, а также увеличивается при приближении к торцам.

Распределение намагниченности во внутреннем слое для короткого стержня практически не зависит от магнитных характеристик материала. Разница между намагниченностью внутреннего и внешнего слоев определяется магнитными характеристиками материала — для образца с большей коэрцитивной силой это различие меньше. При



Рис. 3. Распределение компоненты *B_z* вектора магнитной индукции вдоль продольной оси стержня (O, ● — экспериментальные данные, сплошная линия — расчет по предложенной методике; *H_z^{BIII}*, A/м: ● — 2000; O — 40000)

увеличении длины стержня разница между намагниченностью его внутреннего и внешнего слоев уменьшается, что особенно заметно для стержня с $H_{cs} = 150$ А/м. Дальнейшее увеличение длины стержня ведет к росту абсолютных значений намагниченности в слоях и практически полному совпадению величины намагниченности в них, что наиболее заметно для стержня с λ равной 50 и более. Такой характер распределения намагниченности обусловлен тем, что она определяется величиной внутреннего магнитного поля, равного сумме векторов напряженностей внешнего и размагничивающего полей, которая растет с увеличением относительной длины стержня и имеет большую величину у его поверхности. Увеличение внутреннего поля с ростом относительной длины стержня связано с уменьшением плотности магнитных зарядов на его поверхности, которая создает размагничивающее поле. Так, в стержнях с $\lambda = 2$ при $H_z^{BH} = 2000$ А/м внутреннее поле меньше внешнего примерно на порядок, причем для более мягкого в магнитном отношении стержня $(H_{cs} = 150 \text{ A/m})$ намагниченность меньше, чем для более твердого (*H_{cs}* = 3120 А/м), поскольку размагничивающее поле для более мягкого в магнитном отношении стержня существенно меньше,

чем для более твердого. При $\lambda = 50$ различие в намагниченности внутреннего и внешнего слоев стержня практически исчезает (некоторое отличие наблюдается только в области торцов стержня).

В магнитном поле напряженностью $H_z^{\text{BIII}} = 40000 \text{ А/м}$ внутреннее магнитное поле остается достаточно малым по сравнению с внешним, хотя и увеличивается по абсолютной величине (см. рис. 5). Поэтому и характер намагничивания короткого стержня аналогичен этому процессу в более слабых магнитных полях.

С ростом λ ($\lambda = 15$) внутреннее поле увеличивается, причем быстрее в ближней к центру области стержня (в этой области оно приближается к внешнему), резко уменьшаясь к его краям. При этом наблюдается рост абсолютных значений намагниченности во внутреннем и внешнем слоях стержней, причем на величину намагниченности начинает влиять нелинейная зависимость магнитной восприимчивости материала стержня от величины внутреннего поля (см. рис. 6).

Дальнейшее увеличение λ приводит к тому, что намагниченность в образце стремится к насыщению, характер распределения внутреннего поля практически не зависит от магнитных характеристик материала.



Puc. 4. Распределение компоненты M_z вектора намагниченности и компоненты $H_z^{\text{вн}}$ вектора внутреннего поля вдоль продольной оси стержня по слоям (слои по *r*: внутренний — ●, ■, ▲; внешний — O, □, Δ; H_{cs} , А/м: O, ● — 150; □, ■ — 724; Δ, ▲ — 3120; $H_z^{\text{вш}} = 2000 \text{ А/м}$)



Puc. 5. Распределение компоненты M_z вектора намагниченности и компоненты H_z^{BH} вектора внутреннего поля вдоль продольной оси стержня по слоям (обозначения те же, что и на рис. 4, $H_z^{\text{BH}} = 40000 \text{ A/M}$)

Так как внешнее магнитное поле направлено вдоль оси стержня, то радиальная составляющая вектора намагниченности внутри него формируется только размагничивающим полем поверхности и невелика по величине. Распределение этой составляющей близко к линейному на большей части длины стержня (до z/L = 0,4), а вблизи торцов ее абсолютная величина резко возрастает. Для коротких стержней существенное различие по абсолютной величине этой составляющей во внутреннем и внешнем слоях стержня наблюдается как в слабых, так и в сильных магнитных полях. С ростом λ в сильных магнитных полях это различие на большей части стержня уменьшается и не зависит от магнитных характеристик материала, различие наблюдается только в областях, близких к его торцам. Аналогичен характер изменения радиальной составляющей внутреннего поля.

Изменение коэффициента размагничивания вдоль оси стержня. Во многих работах при оценке магнитного состояния изделий используется такое понятие, как коэффициент размагничивания *N*, являющийся некоторой интегральной величиной, определяющей намагничивание изделия и зависящей от материала изделия, его размеров и величины намагничивающего поля. Как известно, его точный расчет возможен только для тел эллипсоидной формы. Для тел иной формы приме-



Рис. 6. Распределение восприимчивости χ вдоль продольной оси стержня по слоям (обозначения те же, что и на рис. 4)

няют полуэмпирические формулы, которые в основном получены для сплошных стержней круглого и прямоугольного сечения [7]. Кроме того, речь всегда идет о центральном коэффициенте размагничивания, т. е. определенном в центральном сечении образца.

Используя предложенную выше методику, нами проведен расчет коэффициента размагничивания не только в центральном сечении, но и показан характер его изменения вдоль продольной оси стержня.

После окончания расчета по выражению (9) известны компоненты вектора намагниченности и вектора внутреннего поля в образце. Тогда изменение коэффициента размагничивания вдоль продольной оси стержня можно рассчитать по выражению:

$$N_{j} = \frac{H_{zj}^{\rm BIII} - H_{zj}^{\rm BH}}{M_{zj}},$$
 (16)

где j — номер элементов разбиения, принадлежащих к одному сечению стержня, перпендикулярному оси z, а намагниченность M_{zj} , внутреннее $H_{zj}^{\text{вн}}$ и внешнее поля $H_{zj}^{\text{вш}}$ являются интегральными величинами от всех элементов этого сечения.

Результаты расчета для отдельных случаев представлены на рис. 7. Видно, что изменение коэффициента размагничивания для коротких стержней ($\lambda = 2$) практически не зависит от величины внешнего поля и магнитных характеристик материала. С ростом λ ($\lambda = 20$) начинает проявляться отличие в характере распределения N в зависимости от величины внешнего поля. Дальнейшее увеличение λ ($\lambda = 50$) приводит к уменьшению различий в характере распределения в зависимости от величины $H^{\text{вш}}$. Также следует отметить, что увеличение коэрцитивной силы материала ведет к уменьшению

разницы в величинах N, рассчитанных при разных величинах $H^{\text{вш}}$. При $\lambda = 50$ коэффициент размагничивания имеет существенную величину только вблизи торцов стержня.

Предложенная методика является основой для численного моделирования магнитного состояния ферромагнитных тел, перемагничиваемых в однородном или неоднородном квазистатическом магнитном поле.

В практическом плане эта методика может быть применена при разработке намагничивающих систем с накладными и проходными преобразователями. В частности, она использована при определении величины внешнего магнитного поля, обеспечивающего максимально возможную однородность магнитного состояния тел цилиндрической формы, намагничиваемых квазистатическим магнитным полем проходного преобразователя, что позволило определить критерии для выбора его размеров и оценить требуемую мощность при разработке магнитоизмерительной установки УИМХ.

Выводы

С помощью предложенной методики получены хорошо согласующиеся с экспериментальными данными результаты, что дает основание использовать ее для расчета магнитного состояния изделий в форме стержней круглого сечения, а также для расчета и анализа характера послойного распределения намагниченности, внутреннего поля, магнитной восприимчивости в стержне круглого сечения и коэффициента размагничивания вдоль продольной оси стержня.

Установлено, что внешние слои стержня намагничиваются быстрее, чем внутренние. Величина намагниченности и разница в намагниченности внутреннего и внешнего слоев определяется



Рис. 7. Распределение коэффициента размагничивания вдоль продольной оси сплошного цилиндрического стержня (*H*^{BII}₋, A/м: ● — 2000; ○ — 40000)

магнитными характеристиками материала стержня, величиной внешнего поля и отношением длины стержня к его диаметру. С уменьшением коэрцитивной силы стержня, увеличением его относительной длины и увеличением внешнего магнитного поля величина намагниченности стержня возрастает. Разница в намагниченности внутреннего и внешнего слоев возрастает с уменьшением коэрцитивной силой материала стержня, уменьшением его относительной длины и ростом напряженности внешнего магнитного поля.

Показано, что для коротких стержней ($\lambda = 2$) коэффициент размагничивания практически не зависит от величины внешнего поля и магнитных характеристик материала. С увеличением относительной длины стержня размагничивания имеет существенную величину только вблизи его торцов.

 Михеев М. Н., Горкунов Э. С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. — М.: Наука, 1993. — 252 с.

- Курбатов П. А., Аринчин С. А. Численный расчет электромагнитных полей. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 168 с.
- 3. Матюк В. Ф., Осипов А. А., Стрелюхин А. В. Распределение намагниченности вдоль цилиндрического стержня круглого сечения, находящегося в продольном постоянном однородном магнитном поле // Электротехника. 2009. № 8. С. 37–46.
- 4. Матюк В. Ф., Чурило В. Р., Стрелюхин А. В. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном магнитном поле методом пространственных интегральных уравнений. І. Описание методики расчета // Дефектоскопия. 2003. № 8. С. 71–84.
- Матюк В. Ф., Осипов А. А. Математическая модель намагничивания ферромагнетиков // Докл. НАН Беларуси. — 2004. — 48, № 5. — С. 43–45.
- Матюк В. Ф., Осипов А. А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий // Дефектоскопия. — 2007. — № 3. — С. 12–25.
- Матюк В. Ф., Осипов А. А. Некоторые замечания о центральном размагничивающем факторе тел разной формы. I. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров // Там же. — 1999. — № 7. — С. 41–49.

Поступила в редакцию 16.11.2010 УДК 621.19.30

СПОСІБ ВИЯВЛЕННЯ ПЛОЩИННИХ ВІДБИВАЧІВ, ОРІЄНТОВАНИХ В НАПРЯМІ, БЛИЗЬКОМУ ДО НАПРЯМУ ПОШИРЕННЯ ПОЗДОВЖНІХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ 2. Теоретичне обгрунтування та експериментальне підтвердження отриманих результатів

І. Б. КОЛБІН, Ю. О. ВОЛКОВ (УкрНДІгаз, м. Харків)

Виявлення площинних дефектів, орієнтованих у напрямі нормалі до поверхні вводу поздовжніх ультразвукових хвиль, було досить складною задачею, рішення якої до останнього часу не вдавалося знайти у багатьох випадках, наприклад, при контролі зварних з'єднань багатошарових посудин. Результати проведених експериментів дозволяють стверджувати, що дана проблема вирішується, якщо при умові наявності на контрольованій ділянці площинного відбивача використовувати ефект появи серії періодичних сигналів, час поширення яких перевищує час поширення донного сигналу.

Detection of plane defects oriented in the direction of the normal to the surface of application of longitudinal ultrasonic waves was a rather complicated problem. Until recently, it was not possible to solve it in many cases, for instance in monitoring welded joints in multilayered vessels. Results of the conducted experiments allow stating that this problem is solved, if under the conditions of the presence of a plane reflector in the monitored region, the effect of appearance of a series of periodical signals with the propagation time not greater than the propagation time of back-wall reflection signal is used.

Механізм поширення ультразвукових хвиль в твердих тілах з площинним відбивачем описано в роботі [1]. У цьому випадку енергія падаючих хвиль перерозподіляється на утворення відбитих хвиль (геометро-оптичне поле); крайових хвиль (що виникають на гострих кутах або зломах поверхні відбивача) та хвиль, що поширюються по поверхні відбивача (розрізняють поверхневі хвилі Релея та поверхнево-поздовжні).

В приведених в роботі [2] експериментах використовувалися площинні відбивачі, відбиваючі площини яких відхилені на порівняно незначні кути (6°) відносно напряму поширення хвиль. В першу чергу необхідно розглянути геометричну модель відбиття хвиль від поверхні таких відбивачів та донної поверхні еталона для випадків:

площина відбивача повернута відносно акустичної осі перетворювача проти годинникової стрілки [2, рис. 2, *a*];

 площина відбивача повернута за годинниковою стрілкою [2, рис. 2, *б*].

Розрахуємо шлях, який проходять хвилі від поверхні вводу, відбиваючись від відбивача та дна і знову попадаючи на ту ж поверхню для випадку, зображеного на рис. 2, *a* [2] (це допоможе встановити можливість розрізнення цього та донного сигналів).

Шлях *S_h* поширення променя, що виходить з центру перетворювача, буде складатися з відрізків:

$$S_1 = h, S_2 = (H - h)/\cos 2\alpha, S_3 = H/\cos 2\alpha,$$

$$S_h = S_1 + S_2 + S_3 = h + (H - h)/\cos 2\alpha + H/\cos 2\alpha.$$
 (1)

© Колбін І. Б., Волков Ю. О., 2011

Довжина відрізку *L* розраховується за формулою:

$$L = (H - h)/\mathrm{tg}2\alpha + H\mathrm{tg}2\alpha = (2H - h)\mathrm{tg}2\alpha.$$
(2)

Променеву роздільну здатність Δ_{lp} застосованого в експериментах дефектоскопа УД 2-70 з різними перетворювачами можна визначити шляхом вимірювання тривалості зондуючого сигналу разом з ревербераційними шумами $T_{\rm 3p}$. Дані щодо $T_{\rm 3p}$ та розрахованої з її застосуванням величини Δ_{lp} ($\Delta_{lp} = C_l T_{\rm 3p}/2$) наведені в таблиці. Там же наведені експериментальні дані значень променевої роздільної здатності Δ_{le} , отримані із застосуванням спеціального стального еталона.

Підставивши у вирази (1) та (2) фактичні значення параметрів еталона: H = 100 мм, $a = 6^{\circ}$, h = 87,5 мм (або 22,5 мм), отримаємо:

 $S_{87,5} = 202,5$ MM, $L_{87,5} = 23,9$ MM; $S_{22,5} = 204$ MM, $L_{22,5} = 37,7$ MM.

Тобто, для впевненої фіксації цього відбивача тим же перетворювачем розмір 2r останнього повинен бути не меншим за 24 мм у першому випадку та 38 мм у другому.

Розглядати другий випадок ($L_{22,5} = 37,7$ мм) не має сенсу — в практиці проведення ультразвукового контролю перетворювачі з такими великими розмірами не застосовують. Значення $L_{87,5}$ = 23,9 мм практично співпадає з розмірами перетворювача П111-1,25-К20. Але $S_{87,5} = 202,5$ мм (тобто всього на 2,5 мм відрізняється від шляху поширення донного сигналу (2H = 200 мм)). Оскільки $\Delta_{lp} > 7$ мм (таблиця), то корисний і донний сигнали не будуть розрізнятися.

Розглядаючи другий випадок [2, рис. 2, *б*] можна стверджувати, що максимум відбитого сигналу

буде реєструватися тоді, коли центр перетворювача зміщено вправо відносно проекції центру відбивача на робочу поверхню еталона. Використавши позначення та геометричні дані з цього рисунку, визначимо шлях S, по якому поширюється центральний промінь, та відрізок L_1 , у кінцеву точку якого попаде цей промінь після відбиття від центру площини відбивача та дна:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = (x^2 + h^2)^{1/2} + (H-h)/\cos(\alpha_2 - 2\alpha_1) + H/\cos(\alpha_2 - 2\alpha_1) = (3)$$

= $(x^2 + h^2)^{1/2} + (2H - h)/\cos(\alpha_2 - 2\alpha_1)$

~ . . .

$$L_{1} = (H - h)tg(\alpha_{2} - 2\alpha_{1}) + Htg(\alpha_{2} - 2\alpha_{1}) = (4)$$

= (2H - h) tg(\alpha_{2} - 2\alpha_{1}).

Провели практичну перевірку можливості реєстрації сигналу, що поширюється по траєкторії S_1 - S_2 - S_3 . Отримана на екрані дефектоскопа картина зображена на рис. 1: сигнали знаходяться за межами розрізнення (фронти донного сигналу та сигналу, пов'язаного з дзеркальним відбиванням, зливаються). Експериментально визначили, що в положенні найбільш суттєвого розрізнення сигналів значення x становило 14 мм (при h = 43 мм, H = 100 мм і розрахованому значенні $\alpha_2 = 18^\circ$). Згідно з виразами (3) та (4) провели розрахунки і отримали: S = 202,5 мм; $L_1 = 16,5$ мм. Теоретично отримані дані підтверджують експериментальні: незважаючи на оптимальне значення L₁ різниця шляхів донного та дзеркально відбитого від відбивача сигналу становить 2,5 мм, що знаходиться за межами розрізнення сучасних серійних перетворювачів, не дозволяючи реєструвати їх окремо.

Виходячи з викладеного вище, залишається прийняти, що зафіксовані сигнали мають дифракційне походження. Відомо [1, 4], що при падінні хвиль на площинні або об'ємні відбивачі виникають крайові хвилі, або хвилі обіганнязісковзування, або поверхнево-поздовжні та поверхневі хвилі (Релея) або ж сукупність різних хвиль. При проведенні ультразвукового контролю у більшості випадків реєструють сигнали, які відповідають геометро-оптичному відбиттю, а сигнали, спричинені хвилями дифракції, не реєструють, або сприймають як хибні, бо вони мають порівняно низький рівень.

Тепер необхідно розглянути всі можливі дифракційні моделі утворення зафіксованих сигналів.



Рис. 1. Картина на екрані дефектоскопа при дзеркальному відбиванні сигналу від площини відбивача, нахиленої відносно акустичної осі під кутом +6°: 1д — індикація першого донного сигналу; 2 — індикація дзеркально вібитого від поверхні відбивача сигналу; частота ПЕП — 5 МГц; кут введення — 0°; H — 105,1 мм; режим вимірювання товщини — 0...1; підсилення — 49 дБ; діапазон — 56 мм; затримка — 63 мм; швидкість ультразвука — 5940 м/с

При падінні поздовжніх хвиль на гостру грань відбивача утворюються крайові дифракційні хвилі (як поздовжні, так і поперечні [1]). Якщо відбивач має форму витягнутої полоси певної ширини з двома гострими краями, яка перекривається пучком падаючих хвиль, поряд з дзеркально відбитим полем біля кожного гострого краю тріщини утворюється дифракційне поле, а на приймач надходить сумарний сигнал від обох країв. Починаючи з деякого кута між віссю відбивача та віссю перетворювача, складова сигналу, спричиненого крайовими хвилями, може перевищувати складову, спричинену дзеркальним відбиттям від його поверхні. В нашому випадку площина штучного відбивача була повернута відносно акустичної осі на 6°, що сприяє виникненню дифракційного сигналу з часом розповсюдження, близьким до часу розповсюдження сигналу від уявного відбивача з горизонтальною відбиваючою поверхнею, що розміщена на глибині залягання реального відбивача. Але завдяки конфігурації бокової поверхні останнього, дифракційний сигнал поглинається значно більшим за амплітудою дзеркально відбитим від бокової поверхні сигналом [2, рис. 3]. Таке ж екранування відбувається і при розповсюдженні утвореного дифракційного сигналу в напрямі дна

Тривалість зондуючих сигналів та величина променевої роздільної здатності прямих перетворювачів

Тип перетворювача	Робоча частота F, МГц	Тривалість зондуючого сигналу та ревербераційних шумів <i>Т</i> _{зр} , мкс	Розрахована величина променевої роздільної здатності Δ_{lp} , мм	Виміряна величина променевої роздільної здатності $\Delta_{le, MM}$
П111-1,25-К20-002	1,25	2,5	7,4	_
П111-2,5-КН	2,5	1,0	3,0	4
П111-5-КН	5	0,7	2,1	3
П111-5,0-К6-003	5	0,7	2,1	3

АУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

з наступним відбиванням від нього в напрямі перетворювача (але в цьому випадку за рахунок донного сигналу). Можна зробити висновок: зафіксовані періодичні сигнали не можна пов'язати з утворенням дифракційного поля на гострих краях відбивачів.

Залишається розглянути два можливих механізми виникнення періодичних сигналів: за рахунок хвиль Релея або за рахунок поверхнево-поздовжніх хвиль. Для зручності проведення аналізу необхідно пов'язати теоретичний розгляд з практично отриманими результатами.

Хвилі Релея, на відміну від поверхнево-поздовжніх хвиль, можуть поширюватися вздовж поверхні навіть у випадку, якщо вона викривлена (або має зломи). Згідно з [1], у розглянутому випадку на кутах імітаторах дефектів, виготовлених за даними [3], тільки незначна частина енергії утворених поверхневих хвиль витрачається на зворотну трансформацію у поздовжні. Незважаючи на це, провели розрахунки, позначивши товщину виробу *H*, ширину площини відбивача *b*.

Час поширення донного сигналу:

$$\tau = 2H/C_l. \tag{5}$$

Скористались співвідношеннями, наведеними у [1]: $C_t = 0.55 C_l$ та $C_R = 0.93$, $C_t = 0.93(0.55C_l) = 0.51C_l$. Для спрощення розрахунків зробили округлення: $C_R \approx 0.5 C_l$.

Час поширення сигналу по шляху: перетворювач-поверхня відбивача-дно-перетворювач при умові трансформації на площині вертикального відбивача поздовжніх хвиль у поверхневі та їх зворотної трансформації буде складатися з часу поширення поздовжніх хвиль у тілі еталона по шляху 2H - b та часу поширення хвиль Релея в межах відрізку b:

$$\tau_1 = (2H-b)/C_l + b/C_R = (2H-b)/C_l + 2b/C_l = (6)$$

= 2H/C_l + b/C_l.

Затримка сигналу, який пройшов подвійну трансформацію на площині дефекту відносно донного сигналу, становить:

$$\tau_1 - \tau = b/C_l. \tag{7}$$

Раніше було показано, що періодичні сигнали можуть формуватися лише завдяки багатократному відбиванню та наступному «зриву» дифракційних хвиль на краях відбивача. Тобто, наступний за описаним вище дифракційним сигналом може виникати після трьохкратного проходження цих хвиль вздовж поверхні відбивача та їх наступного «зриву» у напрямі донної поверхні. Часова затримка цього сигналу відносно попереднього буде становити:

$$t_2 = [(2H - b)/C_l + 3b/C_R] - [(2H - b)/C_l + b/C_R] = (8)$$

= 2b/C_R = 4b/C_l.

Порівнюючи (7) та (8) можна зробити висновок: теоретично отримані значення τ_1 та τ_2 значно відрізняються, що суперечить експериментально зафіксованим одинаковим інтервалам часової затримки. Це свідчить, що зареєстровані періодичні сигнали не виникають завдяки хвилям Релея, які у порівнянні з поздовжніми мають у два рази меншу швидкість.

Залишається розглянути модель утворення періодичних сигналів за рахунок виникнення поверхнево-поздовжніх хвиль (рис. 2).

Згідно [4] при падінні поздовжніх хвиль на границю розподілу «сталь-повітря» енергія перерозподіляється так, що звуковий тиск у відбитому пучку хвиль становить тільки певну частку від тиску в падаючому і залежить від кута падіння. Якщо застосовується еталон, виготовлений згідно [3], то промені падають на площину відбивачів під кутом 84° і звуковий тиск пучка відбитих хвиль буде становити 60 % від тиску в падаючих, тобто значна частина енергії падаючих хвиль витрачається на утворення дифракційних хвиль (і серед них — поверхнево-поздовжніх [1]). Ці хвилі поширюються вздовж поверхні відбивача і їх швидкість не відрізняється від швидкості падаючих поздовжніх.

На відміну від хвиль Релея, поверхнево-поздовжні хвилі не тільки «зриваються» в об'єм металу на ребрах двогранних кутів площинного відбивача в еталоні, але і відбиваються від них, поширюючись у зворотному напрямі. Завдяки інтерференції з падаючими хвилями вони можуть



Рис. 2. Схема формування сигналу, який виникає внаслідок трансформації на площинному відбивачі поздовжніх хвиль у поверхнево-поздовжні: h — глибина розміщення краю відбивача від поверхні вводу еталона; H — товщина еталона; r — радіус перетворювача; L — відрізок, що з'єднує центр перетворювача з точкою, у яку попадає центральний промінь після подвійної трансформації падаючих поздовжніх хвиль на площині відбивача та відбивання від донної поверхні; S_1-S_4 — відрізки шляху, пройденого хвилями, вздовж центрального променя; $S_{\rm np}$, $S_{\rm 3B}$ — відрізки шляху променів, які формують донний сигнал; α — кут нахилу площини відбивача відносно нормалі до поверхні вводу

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

посилюватись або послаблюватись (в залежності від співвідношення їх фаз).

В проведених експериментах зафіксовано зменшення значень амплітуд донних сигналів в положеннях перетворювача над відбивачем відносно їх значень на вільній ділянці [2, див. таблицю]. Це погоджується з даними робіт [1, 4] щодо зменшення амплітуди донного сигналу у випадку, коли площина відбивача та акустична вісь паралельні.

Розрахуємо шлях S (рис. 2), який проходять хвилі починаючи з поверхні вводу до краю відбивача, поширюючись далі в трансформованому вигляді вздовж його поверхні, «зриваючись» з протилежного краю і знову попадаючи на поверхню вводу після відбивання від дна (тобто суму відрізків: $ON = S_1$, $NM = S_2$, $MP = S_3$ та $PK = S_4$) $S_1 = h$, $S_2 = l$, $S_3 = (H - h - l\cos\alpha)/\cos\alpha$, $S_4 = H/\cos\alpha$,

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 =$$

= $h + l + (H - h - l\cos\alpha)/\cos\alpha + H/\cos\alpha =$ (9)
= $h + l + (2H - h - l\cos\alpha)/\cos\alpha$.

Далі визначимо відстань вздовж поверхні вводу від точки 0 до точки *K*:

$$L = l\sin\alpha + (H - h - l\cos\alpha)tg\alpha + Htg\alpha =$$

= $l\sin\alpha + (2H - h - l\cos\alpha)tg\alpha.$ (10)

Підставивши у (9), (10) параметри застосованого в експериментах еталона (H = 100 мм; $h_6 = 20$ мм; $h_{\pi} = 85$ мм; $\alpha = 6^{\circ}$), отримали: $S_{20} = 201,1$ мм, $L_{20} = 18,9$ мм, $S_{85} = 200,7$ мм, $L_{85} = 12,1$ мм (індекси біля символів *S* та *L* відповідають глибині залягання верхнього краю відбивача відносно поверхні вводу). Тобто, такі значення *S* не дозволяють зареєструвати сигнали, що виникають внаслідок послідовної прямої та зворотної трансформації поздовжніх хвиль на відбивачі, бо відмінність між ними та значенням шляху донного сигналу (2*H*) не перевищує величину променевої роздільної здатності Δl для будь-якого з серійно виготовлених перетворювачів (див. таблицю).

Тепер розглянемо випадок зворотної трансформації поверхнево-поздовжніх хвиль після їх багатократних відбивань від країв відбивача (два рази або більше). Трансформація на ближньому (відносно перетворювача) краю відбивача, що виникає після їх однократного відбивання від дальнього краю, приводить до появи сигналу, який відображає індикація 5 [2, рис. 3, *a*] (наступні індикації 6—10 відображають серію послідовних сигналів, що виникли внаслідок «зривів» хвиль від цього ж краю на наступних етапах багатократного проходження хвиль вздовж його поверхні). Аналогічно до цього — «зриви» хвиль від дальнього краю відбивача після двократного, чотирьохкратного і т. д. відбивання, приводить до формування сигналів, які мають часову затримку, достатню для розрізнення відносно донного сигналу. Така модель формування сигналів підтверджується картиною, зображеною на рис. 3, б в роботі [2]: зафіксоване значення відстані між будь-якими двома уявними відбивачами (або між першим відбивачем та донною поверхнею) співпадає з розміром реального відбивача, виміряного в напрямі поширення хвиль. А це можливо лише при умові, коли швидкість дифракційних хвиль постійна і дорівнює швидкості поздовжніх об'ємних.

Порівняно високий рівень отриманих дифракційних сигналів можна пояснити ефектом їх підсилення за рахунок інтерференції поверхневопоздовжніх хвиль з поздовжніми в прилеглій до поверхні відбивача зоні. Для цього необхідно, щоб в процесі поширення корисного сигналу виконувалась умова щодо тривалості цугів коливань [4]. Звичайно у виріб посилають короткі цуги — імпульси, що містять декілька повних коливань, забезпечуючи мінімальну променеву роздільну здатність. Якщо «хвіст» після відбиття від ближнього відбивача не наздоганяється «головою» цугу, відбитого від дальнього — забезпечується можливість променевого розрізнення сигналів від поруч розміщених відбивачів (у нашому випадку це означає, що виконується умова: відстань між гранями відбивача, на яких відбувається часткове відбивання хвиль у протилежному напрямі, повинна перевищувати променеву роздільну здатність).

Висновки

При падінні поздовжніх хвиль, випромінюваних прямим перетворювачем на поверхню площинного відбивача, вертикально орієнтованого відносно поверхні вводу (або близького до такої орієнтації), утворюються дифракційні поверхнево-поздовжні хвилі, поширення та зворотна трансформація яких спричинює появу сигналів, які можуть бути зареєстровані тим же перетворювачем.

Сигнали, що реєструються, є періодичними — це свідчить про наявність ефекту багаторазового відбивання та зворотного переходу цих хвиль у об'ємні поздовжні на протилежних гранях відбивача.

Значний рівень отриманих сигналів (у порівнянні з рівнем шумів) можна пояснити ефектом їх підсилення за рахунок інтерференції поверхнево-поздовжніх хвиль з поздовжніми, яка відбувається в прилеглій до поверхні відбивача зоні.

Фіксація послідовності таких сигналів при проведенні контролю об'єктів з паралельними гранями (поверхнею вводу та донною поверхнею) свідчить про наявність площинного дефекту, орієнтованому в напрямі, близькому до напряму поширення поздовжніх хвиль.

- Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Белый, А. Х. Вопилкин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
- 2. Колбін І. Б., Волков Ю. О. Спосіб виявлення площинних відбивачів, орієнтованих в напрямі, близькому до напря-

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

му поширення поздовжніх ультразвукових хвиль. Ч. 1. Експериментальне вивчення можливості виявлення площинних дефектів з орієнтацією, близькою до орієнтації акустичної осі перетворювача // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 4. — С. 31–35.

 Пат. 78345 України, МПК (2006) G01N 29/14. Спосіб комплексного діагностування зварних з'єднань посудин та еталон-імітатор зон відриву рулонних обичайок для реалізації цього способу. — Дійсний з 15.03.2007, Бюл. № 3.

 Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов / Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 750 с.

> Надійшла до редакції 29.11.2010

Украинскому Обществу НКТД 20 лет! *Ақция,*

в которой может принять участие любая Организация, располагающая источником R-излучения непрерывного действия.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины создан экспериментально-промышленный образец портативной рентгенотелевизионной системы (РТ) с использованием монокристаллического экрана CsI(TI) и телевизионной камеры на основе высоко-чувствительной ПЗС-матрицы. Благодаря этому появилась реальная возможность для применения рентгеноскопического контроля в полевых условиях с цифровой обработкой результатов контроля без промежуточных носителей информации (типа пленок, полупроводниковых пластин и т.д.).





Установка аппаратуры на объекте

Наблюдение R-изображения на экране

На объектах организации выполняется **бесплатно RT**–контроль с использованием разработанной аппаратуры.

> Тел.: (044) 287-26-66, факс: (044)289-21-66 E-mail: ndt@paton.kiev.ua

ГАММА-ДЕФЕКТОСКОПЫ ДЛЯ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. Н. ХОРОШЕВ, Ю. Е. ВОЛЧКОВ, А. С. ДЕКОПОВ, Е. М. КОСИЦЫН (ОАО «НИИТФА», г. Москва, РФ) Ю. Н. КОЗИН (ОАО «Концерн «Росэнергоатом», г. Москва, РФ)

Рассмотрены вопросы разработки новых и модернизации серийных дефектоскопов, представляющие интерес для специалистов в области неразрушающего контроля промышленных изделий.

This article is devoted to the questions of modifying the serial flaw detectors and development of new flaw detectors. The mentioned questions represent interest for specialists working in the field of non-destructive testing of industrial products.

В настоящее время наиболее актуальной проблемой является замена действующего парка гаммадефектоскопических аппаратов, применяемых для контроля качества сварных соединений и наплавок. В промышленности гамма-дефектоскопы затворного и шлангового типа составляют основу эксплуатационного парка.

По заданию ОАО «Концерн «Росэнергоатом» в 2008 г. ОАО «НИИТФА» приступил к разработке гамма-дефектоскопа общепромышленного назначения нового поколения затворного типа «Стапель Se75Ir192» соответствии В с ГОСТ 23764-79 «Гамма-дефектоскопы. ОТУ». Разработка гамма-дефектоскопа затворного типа «Стапель Se75Ir192» с транспортно-перезарядным контейнером (ТПК к «Стапель Se75Ir192») в 2009 г. была успешно завершена, гамма-дефектоскоп прошел испытания и был рекомендован приемочной ведомственной комиссией ОАО «Концерн «Росэнергоатом» к серийному производству. Один аппарат передан в опытно-промышленную эксплуатацию на Балаковскую АЭС.

Аппарат прошел сертификацию в ОАО «Изотоп» и получил сертификат № RUS/5752/B (V)-96, срок действия до 15.01.2015 г.

Гамма-дефектоскоп «Стапель Se75Ir192» предназначен для проведения радиографического контроля сварных соединений и наплавок в условиях строительства и эксплуатации АЭС и других промышленных изделий. В качестве прототипа при создании гамма-дефектоскопа «Стапель Se75Ir192» использовали устаревшую модель гамма-дефектоскопа «Стапель-5».

При разработке реализована задача применения по возможности двух типов источников в аппарате при незначительном увеличении массы изделия, были приведены в соответствии НРБ-2009 нормы доз для обслуживающего персонала на поверхности радиационной головки, конструктивно изменен блок биологической защиты, введены дополнительные блокировки и трехцветная сигнализация.

Внешний вид гамма-дефектоскопа «Стапель Se75Ir192» приведен на рис. 1.

Благодаря конструктивным решениям в гаммадефектоскопе «Стапель Se75Ir192» стало возможным применение двух типов источников ионизирующего излучения на основе изотопа Селен-75 и Иридий-192. Это позволило расширить технологические возможности гамма-дефектоскопа, снабженного трехканальным транспортно-перезарядным контейнером (ТПК «Стапель Se75Ir192»), разработанным специально для данных гамма-дефектоскопов, поскольку источник Селен-75 позволяет контролировать сварные соединения с толщинами по стали 5...40 мм, а применение источника Иридий-192 расширяет диапазон контроля от 10 до 50 мм.

В составе гамма-дефектоскопа «Стапель Se75Ir192» и его модификации предусматривается: рабочий комплект (радиационная головка, пульт управления ручной, съемный коллиматор, подставка); вспомогательный комплект (контейнер транспортно-перезарядный трехканальный, ЗИП).



Рис. 1. Гамма-дефектоскоп «Стапель Se75Ir192»

© В. Н. Хорошев, Ю. Е. Волчков, А. С. Декопов, Е. М. Косицын, Ю. Н. Козин, 2011

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

Основные характеристики гамма-дефектоскопа «Стапель Se75Ir192»

Антервал рабочих температур, °C-40+40°С	
Мощность экспозиционной дозы в положении хранения, не более:	
 на поверхности радиационной головки, мк3в/ч 	
 на расстоянии 1м от поверхности радиационной головки 	
Габаритные размеры радиационной головки, мм	
Масса радиационной головки, кг, не более	
Расстояние от радиационной головки до пульта (ручное управление), м	5
Максимальный угол загиба троса пульта ручного управления при радиусе загиба не более 400 мм	и, град90
Размер площади глубококоллимированного пирамидального пучка ү-излучения:	
– при фокусном расстоянии F	
– со съемным коллиматором	F×0,5F
Гарантийный срок, мес	
Срок службы, лет, не менее, циклов	
Контейнер транспортно-перезарядный:	
– количество каналов	3
– масса, кг, не более	
— габариты, мм	
Сертификация, тип	B(U)

Замена держателя источника в радиационной головке гамма-дефектоскопа при использовании ТПК проводится в условиях эксплуатации без применения специального инструмента.

В ходе разработки гамма-дефектоскопа «Стапель Se75Ir192» по заданию ОАО «Концерн Росэнергоатом» проведены исследования по увеличению диапазона толщин по стали, контролируемых с помощью источника на основе радионуклида Селен-75 с 5...30 мм до 5...40 мм. По результатам исследований сотрудниками **OAO** «ЦНИИТМАШ» разработаны и согласованы с «Ростехнадзором» методические рекомендации о расширении диапазона контролируемых толщин по стали с помощью источника на основе радионуклида Селен-75. Более подробная статья, посвященная данной методике, будет опубликована в ближайшем выпуске журнала.

В процессе приемочных испытаний гамма-дефектоскопов были высказаны пожелания модифицировать гамма-дефектоскоп «Стапель Se75Ir192» только под источник Селен-75 с защитой из вольфрамового сплава.

Проведенный анализ использования источника Селен-75 позволил приступить к разработке, изготовлению и сертификации модернизированного источника гамма-дефектоскопа под наименованием «Стапель Se75W» с защитой из вольфрама. В гамма-дефектоскопе «Стапель Se75W» используется источник Селен-75 активностью до 80 Ки. Эксплуатация и обращение с данной моделью не требует строгой отчетности, так как не содержит блока защиты из обедненного урана, приравненного к источникам ионизирующего излучения.

В настоящее время гамма-дефектоскоп «Стапель Se75W» проходит испытания с последующим проведением сертификации.

В процессе разработки находится модель затворно-роторного гамма-дефектоскопа, предназначенного для работы со специальным штативом с источником ионизирующего излучения на основе изотопа Se-75 активностью до 80 Ки, материал биологической защиты — вольфрам. Гамма-дефектоскоп предназначен для контроля сварных соединений труб диаметром от 25 до 100 мм с толщиной стенки 5...30 мм. Небольшая масса (до 7,5 кг) и габариты 160×100 мм позволяют применять данную модель гамма-дефектоскопа в труднодоступных местах.

В соответствии с новыми нормативными требованиями специалистами ОАО «НИИТФА» ведется разработка нескольких аналогов общепромышленного шлангового гамма-дефектоскопа типа «Гаммарид» с источником Иридий-192 активностью до 120 Ки и Селен-75 активностью 100 Ки, предназначенных для замены широко применяемых до последнего времени шланговых гамма-дефектоскопов разработки ФГУП «ВНИ-ИТФА» 1970–1975 гг. и серийно выпускавшихся заводом «Балтиец» (г. Нарва). Предполагаемый срок серийного выпуска четвертый квартал 2011 г. (рис. 2).

Продолжается выпуск шланговых гамма-дефектоскопов с источниками Кобальт-60 ($E_{\gamma} = 1,25$ МэВ, $T^{1}/_{2}$ — 5,25 лет), разработанных ОАО «НИИТФА».



Рис. 2. Гамма-дефектоскоп «Гаммарид 2010»

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 3. Гамма-дефектоскоп «РИД КТМ-6»

Гамма-дефектоскопическая установка «РИД КТМ-6» (рис. 3) с источником ионизирующего излучения на основе изотопа Кобальт-60 активностью до 400 Ки предназначена для радиометрического или радиографического контроля изделий с толщинами до 250 мм по стали. Установка используется для работы в закрытых специализированных камерах или боксах. Управление режимами работы гамма-дефектоскопа осуществляется программно-дистанционно на расстоянии до 100 м. Электрическое питание от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Источник подается по ампулопроводу на расстояние до 12 м, масса радиационной головки ≈ 350 кг, материал биологической защиты — обедненный уран. В состав гамма-дефектоскопа входят двухканальные транспортно-перезарядные контейнеры, коллиматоры, ампулопроводы.



Рис. 4. Внешний вид индикатора радиационного поля (ДРП-10)

В качестве дополнительной опции затворные и шланговые модели аппаратов будут снабжаться индикаторами радиационного поля (ДРП-10) (рис. 4), разработанными в ОАО «НИИТФА» (масса 45 г, габариты: Ø50×16 мм), повышающими уровень информированности персонала о положении источников гамма-излучения («Хранение», «Перемещение по ампулопроводу», «Просвечивание») в процессе работы операторов с гамма-дефектоскопами и, следовательно, безопасности обслуживания гамма-дефектоскопов.

Индикатор поля обеспечивает подачу светового (звукового) сигнала при превышении уровня излучения выше определенного значения (200 мкЗв/ч). Режим питания индикатора автономный, напряжение питания ±3В.

Эти индикаторы могут устанавливаться непосредственно на корпусах гамма-дефектоскопов, рентгеновских аппаратах или на контролируемых

Проектные	характеристики	шлангового	гамма-дефект	оскопа новой	серии «I	аммарид 2	2010»
Интервал раб	бочих температур, °С.					40	+40 °C
Мощность э	кспозиционной дозы в	положении хра	нения, мкЗв/ч, не	более			

Molificer skeneshighennen gesst b nenekennin Aparennik, sikes i, ne eestee	
– на поверхности радиационной головки	
– на расстоянии 1 м от поверхности радиационной головки	
Масса радиационной головки, кг, не более	
Типы применяемых источников	
Селен-75	$T_{1/2}^{1} = 120$ дней, $Q \le 80$ Ки
Иридий-192	$T^{1}/_{2} = 74$ дней, $Q \le 120$ Ки
Расстояние от радиационной головки до пульта (ручное управление), м, не менее	
ампулопровод, м, не менее	
Максимальный угол загиба троса пульта ручного управления при радиусе загиба не более	е 400 мм, град90
Подача источника излучения по ампулопроводу, до, м	
– по горизонтали	
– по вертикали	
Гарантийный срок, мес	
Срок службы, лет, не менее, циклов	
Сертификация, тип	B(U)

Характеристики индикаторов радиационного поля серии «ДРП-10»

	тип крепления	
	«ДРП-10 С», «ДРП-10 3»	магнитное (клипса)
5	Гип регистрируемого излучения	гамма, рентген
(Срок службы, не менее, лет	
5	Гип индикатора	
	ДРП-10 С	Светодиод SUNR-300 ($I_{cb} = 380$ мКд)
	ДРП-10 3	. Звуковой индикатор ЗП-6 ($F_p = 4 \ \kappa \Gamma \mu$)

. . . .

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

изделиях и предназначены для повышения безопасности персонала при работе с источниками ионизирующего излучения.

Выводы

Представлена локализованная информация по отдельным моделям серийной гамма-дефектоскопической аппаратуры, разработанной и выпускаемой ОАО «НИИТФА».

Вниманию потенциальных потребителей предложены новые модификации гамма-дефектоскопа серии «Стапель», обеспечивающие глубокую коллимацию фронтального пучка излучения:

- «Стапель Se75Ir192» (с защитой из обедненного урана); – «Стапель Se75W» (с защитой из вольфрама). Одновременно представлена информация ранних разработок по универсальной гамма-дефектоскопической аппаратуре, оснащаемой излучателями на основе радиоизотопа Со-60, а также аппаратуре нового поколения.

- ГОСТ 23764–79. Гамма-дефектоскопы. Общие технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов. — 5, 8 с.
- Разработка и введение в опытно-промышленную эксплуатацию гамма-дефектоскопа «Стапель-5 Se75Ir192» / Седьмая межд. научно-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»: Тез. докл., 2010 г. — С. 212.

Поступила в редакцию 05.08.2010



ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЗЕРВУАРА ВМЕСТИМОСТЬЮ 50 тыс. м³ ИЗ СВАРНЫХ РУЛОННЫХ ЗАГОТОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАЛИ 16Г2АФ

В. М. ГОЛИНЬКО (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены некоторые особенности полного технического диагностирования и восстановления работоспособности резервуара вместимостью 50 тыс. м³, стенка которого выполнена из сварных рулонных заготовок с использованием высокопрочной стали марки 16Г2АФ. Предложены технические решения по восстановлению работоспособности емкости при проектном уровне налива нефти на срок не менее 20 лет после капитального ремонта.

Some peculiarities of full technical diagnostics and restoration of serviceability of a tank of 50 thousand m3 capacity, the wall of which is produced of welded coiled blanks using high-strength steel of grade 16G2AF are considered, the technical solutions on restoration of serviceability of the tank at the project level of oil loading for the period of not less than 20 years after capital repair were offered.

Резервуары для хранения нефти являются объектами высокой взрыво- и пожароопасности. Принимая во внимание требования к защите окружающей среды, одной из актуальных задач является обеспечение их надежной и безаварийной работы. Анализ технического состояния резервуаров показывает, что по мере увеличения срока эксплуатации они подвержены коррозионным повреждениям и деформациям, подращиваниям существующих дефектов, возникновению трещин в местах концентрации напряжений, неравномерным просадкам основания, появлению хлопунов и других дефектов. Постоянная потребность в увеличении количества резервуаров и объемов хранения нефти и нефтепродуктов требует эффективного и безопасного использования эксплуатирующихся емкостей. Решение этой задачи в значительной мере обеспечивается квалифицированным техническим обслуживанием резервуаров и своевременным диагностированием, соблюдением графиков и качественным выполнением текущих и капитальных ремонтов, соблюдением правил техники безопасности в процессе эксплуатации резервуаров как объектов I и II классов ответственности.

В Украине резервуары вместимостью 50 тыс. м³ со стенками с использованием высокопрочной стали марки 16Г2АФ построены в 1982–1984 гг. на одной из нефтеперекачивающих станций (НПС) ОАО «Укртранснефть». Техническое диагностирование и восстановление работоспособности этих резервуаров на протяжении нескольких последних лет выполняется сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

Краткая техническая характеристика резервуара вместимостью 50 тыс. м³. Тип резервуара

© В. М. Голинько, 2011

— наземный вертикальный цилиндрический стальной номинальной объемом 50 тыс. м³ с плавающей крышей (рисунок). Резервуар построен по проекту «ЦНИИпроектстальконструкция» (Москва), шифр объекта — 10-Ф1418-1-КМ.

Фактические данные. Внутренний диаметр 60700 мм, высота стенки 17880 мм (таблица). Стенка состоит из 12 поясов. Номинальные толщины листов поясов, начиная с нижнего: 17+16+ +14+13+11+10+10+10+10+8+8+8 мм. Для поясов с I по IX включительно использована, по данным завода-изготовителя металлоконструкций, высокопрочная сталь марки 16Г2АФ по ГОСТ 19282, для остальных поясов — с X по XII включительно сталь ВСт3Гпс5 по ГОСТ 380. Для обеспечения проектной цилиндрической формы в процессе монтажа, а также общей устойчивости при эксплуатации на V и VIII поясах стенки устроены промежуточные кольца жесткости из гнутых элементов, приваренных непосредственно к стенке. Стенка через контурные листы днища опирается



Общий вид вертикального цилиндричекого стального резервуара вместимостью 50 тыс. м³

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Результаты проверочных расчетов на статическую прочность стенки резервуара РВС-50000 ПП (до ремонта)

11	оперечное сечение стенки, мм	Номера поясов стенки, считая снизу	Проектые толиины, мм, и марки стали поясов стенки ио данным чертежей КМД	завода-изготовителя металлоконструкций	Фактичсские толщины поясов степки на папболее прокорродированиых участках, мм	Требуемые толщины, мм, и марки стали поясов стенки по условиям обеспечения статической прочности после капремонта при максимальном	уровие наполисния исфтью 1630 см
د		XII	8		7,06	5,60	
		XI	8	BCr3fluc5	7,13	5,60	BCr3fhc5
		X	8		7,00	5,60	
		IX	10		9,30	5,00	
0	1490	VIII	10		7,43 (ВстЗГпс5)	6,70	
1788	330 CN	VII	10		9,23	8,40	
	1490	VI	10	Г2АФ-12	7,54 (ВстЗГис5)	8,59	2AФ
	$H_{\rm max}^{\rm 11490} = I$	I.	11	16	10,13	10,03	161
		IV	13		10,77	11,47	
	1490	III	14		12,41	12,92	
	R _{un} = 30350	11	16		13,48	14,36	
<u>_</u>		1	17		15,94	18,0	10F2ΦБ

на кольцевой железобетонный монолитный фундамент.

Основные конструктивные элементы резервуара — стенка, днище (центральная часть), плавающая крыша (центральная часть) изготовлены на заводе металлоконструкций в виде сварных рулонированных полотнищ [1– 4]. Первые резервуары вместимостью 50 тыс. м³ со стенками из рулонных заготовок с использованием стали 16Г2АФ построены на одном из нефтеперерабатывающих заводов Российской Федерации [5].

Условия эксплуатации резервуара. Согласно нормативному документу СНиП 2.01.07–85 для района расположения резервуара: снеговая нагрузка $S_0 = 0,5$ кПа, ветровая нагрузка $W_0 = 0,38$ кПа, внутреннее избыточное давление — отсутствует, разрежение воздуха в емкости по СНиП 2.01.07–85.

-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Объемы технического диагностирования резервуара. Техническое диагностирование резервуаров, расположенных в нефтепарках в системе ОАО «Укртранснефть», проводится в соответствии с требованиями действующего нормативного документа РД 39-0147103-385–87 [6] с учетом требований ВБН В.2.2-58.2–94 [7].

Основной целью технического диагностирования являются: контроль технического состояния конструктивных элементов резервуара, определение пригодности резервуара к дальнейшей эксплуатации, поиск места и определение причин отказа (повреждения), определение необходимых объемов ремонтных работ для дальнейшей безопасной эксплуатации при максимальном технически возможном уровне налива нефти с гарантированным сроком работоспособности не менее 20 лет.

Для достижения этой цели выполнялось полное техническое диагностирование резервуара с выведением его из эксплуатации, включающее согласно требованиям РД 39-0147103-385-87 следующее: ознакомление с технической документацией (технический паспорт и проект резервуара, технологическая карта резервуарного парка и др.); сбор и анализ данных о проведенных ранее обследованиях, описание проведенных ремонтов; внешний осмотр сварных соединений, поверхности стенки, днища, плавающей крыши, катучей лестницы, опорной фермы, приемо-раздаточных патрубков и люков-лазов, выявление в этих конструктивных элементах дефектов и повреждений; замеры фактических толщин конструктивных элементов резервуара; нивелирование наружного контура днища резервуара и верхних кромок наружных кольцевых листов коробов плавающей крыши, опорной фермы катучей лестницы; проверку состояния основания и отмостки; проверку геометрической формы стенки резервуара (замеры отклонений от вертикали образующих стенки); замеры зазоров между коробами крыши и стенкой резервуара, между направляющими крыши и патрубками в ее коробах; проверку состояния кольцевого уплотнения между плавающей крышей и стенкой резервуара, между направляющими и плавающей крышей; неразрушающий контроль сварных соединений физическими методами (в объеме требований СНиП III-18-75 [8]); проверочные расчеты стенки на статическую прочность по кольцевым напряжениям с определением максимального допустимого уровня наполнения нефтью с учетом фактических толщин листов ее поясов; разработку вывода о техническом состоянии резервуара и рекомендаций по ремонту и дальнейшей эксплуатации резервуара.

Дополнительно к требованиям РД 39-0147103-385-87 выполняли следующие работы [9].

1. Изучение фактической нагруженности. Уровни заполнения нефтью резервуара определяли за три месяца до его выведения из эксплуатации. При этом до капитального ремонта после 23 лет предыдущей эксплуатации максимальный уровень составлял 811 см, а минимальный 316 см. Резервуары вместимостью по 50 тыс. м' на НПС эксплуатируются в режиме «с подключенным резервуаром». В этом случае наиболее вероятные отношения фактического уровня заполнения резервуара к максимально допустимому 0,3...0,8. Анализом спектра переменных нагружений таких резервуаров при коэффициенте ассиметрии цикла напряжений $R_{\sigma} > 0$ установлено, что количество нагружений за год составляет около 336 циклов. При эксплуатации на протяжении 50 лет можно ожидать 1,68·10⁴ циклов. Эти данные свидетельствуют о том, что резервуары вместимостью 50 тыс. м³ на НПС работают в режиме малоциклового нагружения.

2. Нивелирование днища резервуара в трех диаметральных направлениях. Это позволило сделать следующие выводы: практически днище имеет проектный уклон 1:100 от центра к стенке; днище свободно, без натяжения, расположено на песчаном основании.

3. Замеры фактических толщин всех листов на нижней (с I по IX пояс включительно) части стенки из стали $16\Gamma 2A\Phi$. Это позволили выявить шесть листов с явно заниженными значениями толщин в сравнении с проектными. Фактические толщины III, IV поясов по толщине, VI пояса по толщине и марке стали, VIII пояса по марке стали не отвечают соответствующим параметрам по условию обеспечения статической прочности стенки при проектном уровне заполнения резервуара нефтью, равном 1630 см, а поэтому фактический уровень до капитального ремонта составлял всего 811 см.

4. Замеры твердости листов из стали 16Г2АФ переносным твердомером. Это позволило выявить отдельные листы другой марки стали, а именно ВСт3Гпс5 вместо 16Г2АФ-12 (см. таблицу).

5. Анализ достаточности усиления мест врезок люков-лазов, приемо-раздаточных и других патрубков.

6. Увеличение объемов контроля качества вертикальных сварных соединений для части стенки из стали 16Г2АФ неразрушающими физическими методами (радиографическим, ультразвуковым).

7. Проверка состояния и геодезическая съемка обвалования резервуара для определения фактического объема карэ.

8. Проверочный расчет стенки на общую устойчивость с учетом двух промежуточных колец жесткости. Особенность этого расчета состоит в том, что при определении критических напряжений σ_{cr2} вместо общей длины оболочки (расстояния между днищем и верхней кольцевой площадкой) принято расстояние между кольцами жесткости, поскольку фактический момент

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

инерции промежуточного кольца жесткости $J_{x\phi a \kappa \tau} = 15340 \text{ см}^4$ больше необходимого $J_{x h e o \delta} = 9830 \text{ см}^4$. В этом случае можно считать промежуточное кольцо жесткости диском.

При проверочных расчетах резервуаров на прочность с учетом хрупкого разрушения и малоцикловую прочность возможен следующий подход. Необходимая прочность и работоспособность стенки резервуаров, в том числе с учетом хрупкого разрушения и малоцикловой прочности, обеспечивается в первую очередь выбором марки стали в соответствии со СНиП II-23-81* [10], Приложение 1 и ВБН В.2.2-58.2-94, Приложение 3 и конструктивными решениями, которые исключают переход металла стенки с существующими в ней дефектами в хрупкое состояние или появление местных напряжений, которые превышают предел текучести. Существующие дефекты (подрезы основного металла, угловые деформации сварных соединений, смещения кромок, дефекты в швах и др.) не должны превышать допустимые величины. Если на стенке резервуара зачищены места приварки монтажных устройств и обварены существующие накладки, то как основной концентратор напряжений на стенке можно принять поперечные к кольцевым напряжениям сварные швы кольцевых и овальных усиливающих накладок люков-лазов и приемо-раздаточных патрубков с обвариванием их по всему контуру. Такой элемент по СНиП II-23-81*, табл. 83* относится к 4-й группе элементов. С учетом хрупкого разрушения расчеты показывают, что согласно СНиП II-23-81* и ВБН В.2.2-58.2-94 максимальные расчетные напряжения в стенке резервуаров вместимостью 50 тыс. м³, изготовленных до 1982 г., не должны превышать для стали ВСт3сп5 (верхние пояса стенки) 234 МПа, для стали 16Г2АФ (нижние пояса стенки) 353 МПа. Приведенные значения превышают рабочие кольцевые напряжения в стенке. Расчеты показывают, что для 4-й группы элементов при условии обеспечения малоцикловой прочности максимальные напряжения не должны превышать для части стенки из стали ВСт3сп5 265 МПа, для части стенки из стали 16Г2АФ 390 МПа, что также больше действующих в стенке расчетных кольцевых напряжений, которые составляют не более 2/3 предела текучести стали.

Как видно из приведенных данных, при типовой конструкции резервуара и температуре эксплуатации не ниже минус 30 °С ее прочность с учетом хрупкого разрушения и малоцикловой прочности обеспечивается правильным выбором марки стали стенки, оптимальными конструктивными решениями и технологией сварки.

Таким образом, в связи с отсутствием в действующем нормативном документе РД 39-0147103-385–87 упомянутых выше дополнительно выполненных технологических операций, необходимых для освидетельствования технического состояния сварных металлоконструкций резервуаров вместимостью 50 тыс. м³, появилась необходимость в доработке и создании нового комплексного нормативного документа Украины по техническому диагностированию, ремонту и реконструкции нефтяных емкостей.

Основные технические решения по восстановлению работоспособности резервуара по результатам полного технического диагностирования. Для восстановления работоспособности резервуара вместимостью 50 тыс. м³ с гарантированным сроком службы не менее 20 лет согласно требованиям нормативного документа РД 39-0147103-385–87 и учетом (по возможности), требований ВБН В.2.2-58.2–94 при максимальном технически возможном уровне налива нефти $H_{\rm max} = 1630$ см в процессе капитального ремонта резервуара впервые после 23 лет эксплуатации выполнялись такие основные технологические операции:

— замена всех существующих контурных листов днища новыми листами номинальной толщиной 14 мм из стали марки 10Г2ФБ по ТУ 14-1-4083–86;

 — замена всех существующих листов центральной части днища новыми номинальной толщиной 6 мм из стали марки Ст3сп5-св по ГОСТ 14637;

— замена всех листов I, считая снизу, пояса стенки новыми листами номинальной толщиной 18 мм размерами 1600×8000 мм из стали марки 10Г2ФБ;

— замена отдельных листов на средних и верхних поясах стенки (на I–IV, VI и VIII поясах) новыми листами соответствующей толщины из стали 10Г2ФБ;

— в связи с наличием недопустимых угловых деформаций (например, до 12 мм, замерянных на базе 500 мм на I поясе стенки толщиной 17 мм), смещений свариваемых кромок (до 7 мм при номинальной толщине 17 мм) и сочетании упомянутых дефектов выполнена замена всех (7 шт.) монтажных вертикальных стыковых соединений стенки на II–XI поясах листами-вставками по технологии ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины с установлением технологических колец жесткости [11–14];

— удаление выявленных трещин в заводских вертикальных и кольцевых сварных стыковых соединениях по технологии ИЭС им. Е. О. Патона с повторным радиографическим контролем отремонтированных участков; ремонт участков сварных соединений с недопустимыми дефектами по результатам неразрушающего физического (радиографического, ультразвукового) контроля. В 2003 г. на одном из резервуаров объемом 50 тыс. м³ выполнен ремонт заводского кольцевого шва между I и II поясами в районе пересечения его с заводским вертикальным сварным соединением. По технологии ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

без выведения резервуара из эксплуатации удалена с применением сварки продольная трещина глубиной 13 мм длиной 100 мм в зоне сплавления кольцевого стыкового шва. Трещина выходила на внешнюю поверхность стенки, поэтому была выявлена специалистами НПС визуальным осмотром;

 удаление на всей поверхности стенки остатков сварных швов с последующим контролем на части стенки из стали 16Г2АФ цветным методом (ГОСТ 18442) с целью выявления поверхностных дефектов;

— ремонт обоих существующих промежуточных колец жесткости, приваренных непосредственно без зазора к V и VIII поясам стенки для обеспечения орошения по всей высоте стенки водой на случай пожара.

Как показали исследования, выполненные в ИЭС им Е. О. Патона НАН Украины [15], заводские вертикальные сварные соединения стенок резервуаров, выполненых с использованием рулонных заготовок из стали 16Г2АФ, после 20...25 лет эксплуатации в режиме малоциклового нагружения сохранили высокую работоспособность и их остаточный ресурс обеспечивает дальнейшую безопасную эксплуатацию резервуаров на протяжении не менее 20 лет, что соответствует требованиям нормативного документа Украины для новых резервуаров. Во время периодического полного технического диагностирования резервуаров вместимостью 50 тыс. м³ необходимо выполнять радиографический и ультразвуковой контроль заводских вертикальных швов не менее, чем на пяти нижних поясах стенки.

Вывод

Для выполнения заданий технического диагностирования нефтяных резервуаров необходима разработка стандарта организации Украины СОУ «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование, ремонт и реконструкция» с учетом результатов исследований и накопленного опыта ведущих организаций и специалистов.

- 1. Раевский Г. В. Изготовление стальных вертикальных цилиндрических резервуаров методом сворачивания. — М.: Л.: Гостоптехиздат, 1952. — 116 с.
- Корниенко В. С., Поповский Б. В., Линевич Г. В. Изготовление и монтаж стальных резервуаров и газгольдеров. — М.: Стройиздат, 1964. — 320 с.
- Билецкий С. М., Голинько В. М. Индустриальное изготовление негабаритных сварных листовых конструкций. — Киев: Наук. думка, 1983. — 272 с.
- Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П., Голинько В. М. К шестидесятилетию промышленного применения технологии изготовления цилиндрических резервуаров из рулонных заготовок // Автомат. сварка. — 2009. — № 2. — С. 35–37.
- 5. *Изготовление* сварных полотнищ стенок резервуаров вместимостью 50 тыс. м³ методом рулонирования / А. Е. Аснис, В. И. Новиков, В. М. Голинько и др. // Там же. 1979. № 12. С. 37–40, 49.
- 6. *РД 39-0147103-385–87.* Руководящий документ. Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988. 282 с.
- ВБН В.2.2-58.2–94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. — Київ: Держкомнафтогаз, 1994. — 98 с.
- СНиП III-18–75. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции. — Введ. 01.01.77.
- Голінько В. М. Удосконалення нормативної документації по технічному діагностуванню вертикальних циліндричних резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів // Матер. 6-тої Нац. наук.-техн. конф. і виставки "Неруйнівний контроль та технічна діагностика." — 2009. — С. 312–315.
- СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. — Введ. 01.01.82.
- Барвинко Ю. П., Барвинко А. Ю., Каргин А. Ю. Восстановление работоспособности резервуаров для хранения нефти со стенками из рулонных заготовок вместимостью 20 и 50 тыс. м³ // Монт. и спец. работы в строительстве. 2006. № 10. С. 5–13.
- Барвинко Ю. П., Голинько В. М., Барвинко А. Ю. Повышение работоспособности вертикальных монтажных сварных соединений стенки цилиндрических резервуаров, построенных из рулонированных заготовок // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 27–32.
- О работоспособности вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью 50 тыс. м' из стали 16Г2АФ / А. Ю. Барвинко, Ю. П. Барвинко, В. М. Голинько и др. // Трубопроводный транспорт нефти. — 1999. — № 9. — С. 24–27.
- Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П. Требования к оценке эксплуатационной надежности цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов после выполнения их капитального ремонта // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 1. — С. 14–17.
- Барвинко А. Ю. Оценка остаточного ресурса сварных соединений вертикальной стенки резервуаров после 20...25 лет эксплуатации // Автомат. сварка. — 2009. — № 5. — С. 42–45.

Поступила в редакцию 11.10.2010

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 09Г2С МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. И. ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ, С. Б. КАСАТКИН, В. А. ЯЩУК (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрено определение степени повреждаемости металла при циклическом нагружении методом магнитной памяти. Приведены экспериментальные данные о влиянии переменного нагружения сварных соединений конструкционной стали 09Г2С на изменение значения градиента магнитного поля в тавровых образцах вблизи угловых швов. Установлено, что с увеличением количества циклов нагружения постепенно возрастают значения градиента магнитного поля. Резкое повышение величины градиента магнитного поля наблюдается при приближении момента зарождения усталостной трещины и ее развитии.

The determination of level of damageability of metal at cyclic loading using method of magnetic memory is considered. The experimental data on the influence of variable loading of welded joints of structural steel 09G2S on the change of gradient value of magnetic field in T-specimens in vicinity of fillet welds are given. It was established that with the increase of number of loading cycles the gradient value of magnetic field is gradually increased. Sharp increase of gradient value of magnetic field is observed in approaching the moment of fatigue crack initiation and its propagation.

В настоящее время из неразрушающих методов контроля все большее значение приобретает магнитометрический метод (метод магнитной памяти) [1, 2]. Это новый метод, который позволяет по анализу распределения магнитного поля на поверхности объекта выявлять зоны концентрации напряжений и прогнозировать места появления дефектов. Метод применяется в энергетике, нефтехимической и газовой промышленности. Используя его для выявления напряженно-деформированных участков в различных объектах, где под действием циклического нагружения происходят структурные изменения в металле и в дальнейшем появляются усталостные трещины, можно прогнозировать зоны появления дефектов при дальнейшем нагружении.

Рассматриваемый диагностический метод в настоящее время интенсивно развивается во многих странах. На 17-й Всемирной конференции по



Рис. 1. Тавровый образец из стали 09Г2С для испытаний © В. И. Загребельный, С. Б. Касаткин, В. А. Ящук, 2011

неразрушающему контролю, которая проходила с 25–28 октября 2008 г. в Шанхае, этому методу было посвящено более 20 докладов.

Контроль магнитометрическим методом осуществляется без зачистки металла и специального намагничивания и позволяет выполнять экспрессконтроль качества сварных соединений в ручном и автоматическом режиме на различных изделиях из углеродистых и феррито-аустенитных марок сталей.

Контроль выполняется с помощью специализированных малогабаритных приборов, имеющих автономное питание, сканирующие и регистрирующие устройства.

С целью широкого применения в Украине метода магнитной памяти металла и разработки конкретных методик для их использования в различных отраслях народного хозяйства Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины подготовлен проект национального стандарта «Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування і конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги» [3].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведена научно-исследовательская работа, посвященная влиянию циклического нагружения тавровых образцов из конструкционной стали 09Г2С ($\sigma_{0,2} = 350$ МПа) с угловыми сварными соединениями на изменения распределения магнитного поля в зонах сварных соединений. Для исследований использовали образцы толщиной 10 мм и размером 120×450 мм с поперечным по отноше-

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 2. График распределения градиента $|dH_p/dl|$ вдоль сварного шва образца № 2 (левая сторона) при циклическом нагружении до 250000 циклов (A — трещина длиной 5 мм)

нию к действиям усилий ребром высотой 40 мм, которое приваривалось к пластине угловыми швами (рис. 1). Эти образцы широко применяются для усталостных испытаний [4].

Угловые швы выполняли с полным проваром (по ГОСТ 14771–76). Сварку тавровых образцов выполняли механизированным способом проволокой сплошного сечения марки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в углекислом газе и подвергали циклическому нагружению симметричным консольным изгибом с напряжением цикла 160 МПа при частоте 14 Гц. Испытания на циклическое нагружение выполняли на усталостной машине марки УМП-02. После каждых 50 тыс. циклов нагружения образец вынимали из испытательной машины и вблизи угловых швов измеряли распределение напряженности магнитного поля с фиксацией нормальной составляющей магнитного поля и строили графики Н_р градиента К_{ин} интенсивности распределения магнитного поля рассеяния. Градиент интенсивности $K_{\mu\mu} = dH_p/d l (l - dH_p)/d l$ перемещение феррозондового датчика) является важным информационным параметром повреждаемости металла, численные значения которого характеризуют степень его повреждаемости. На рис. 2 показано образование трещины длиной 5 мм в середине образца после 250000 циклов нагружения и значение градиента $42 \cdot 10^3$ A/m².

Проведенные исследования позволили получить следующие результаты. Наиболее интенсивное увеличение градиента магнитного поля наблюдалось в средней по ширине части образцов. При испытании двух идентичных тавровых образцов значения градиента магнитного поля в средней части образцов менялись от 10...13.103 до 30...35·10 А/м² при увеличении количества циклов нагружения от 30 до 250...270 тыс. После 250 тыс. циклов нагружения в одном из образцов на линии сплавления с левой стороны от ребра образовывалась усталостная трещина длиной 5 мм (рис. 3). После 270 тыс. циклов нагружения в другом образце образовалась усталостная трещина длиной 1 мм с правой стороны от ребра. После 330 тыс. циклов нагружения в этом же об-



Рис. 3. Графики распределения градиента магнитного поля вдоль оси шва в зависимости от количества циклов нагружения тавровых образцов из стали 09Г2С на расстоянии 20 (*a*), 50 (*b*), 70 (*b*) и 100 (*c*) мм от начала шва: ○, — образец № 1; •, ■ — № 2; ○, • — левая сторона образцов; □, ■ — правая; трещина длиной 1 мм (1); 2 (2); 5 (3); 25 (4); 1,8 (5); на всю длину шва (6 и 7)

разце образовалась усталостная трещина длиной 1,8 мм с левой стороны от ребра. После образования в образцах усталостных трещин и роста этих трещин при дальнейшем циклическом нагружении наблюдалось более интенсивное увеличение значений градиента магнитного поля (от $30...35 \cdot 10^3$ до $60...70 \cdot 10^3$ А/м²) при увеличении количества циклов нагружения от 250...270 до 350 тыс.

Таким образом, полученные данные показывают, что перед образованием в образцах усталостных трещин наблюдается интенсивное увеличение градиента магнитного поля при циклическом нагружении. Это увеличение градиента магнитного поля вызвано образованием в металле образцов под действием циклического нагружения устойчивых полос скольжения, которые предшествуют развитию усталостных трещин [5].

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Из наиболее очевидных областей применения метода является выявление напряженно-деформированных участков на объекте, где в дальнейшем появляются усталостные трещины, т. е. можно прогнозировать места их образования, если объект достигает 75...90 % циклических нагружений до их появления.

1. Загребельный В. И. Магнитный контроль напряженнодеформированного состояния сварных соединений и стальных металлоконструкций, определение их остаточного ресурса // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 4. — С. 31— 36.

- 2. Власов В. Т., Дубов А. А. Физические основы метода магнитной памяти метала. — М.: ЗАО «ТИССО», 2004. — 424 с.
- ДСТУ 4857:2007. Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу. Загальні вимоги / В. О. Троїцький, В. І. Загребельний, О. В. Мозговий, І. А. Заплотинський.
- 4. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений. Киев: Наук. думка, 1973. — 215 с.
- 5. Горицкий В. М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. — 402 с.

Поступила в редакцию 11.10.2010

Дата	Место проведения мероприятия	Мероприятие	Организатор (контакты)		
15-17.03	СПетербург, Россия	Петербургская техническая ярмарка	Тел./факс: (812) 320 96 76, 320 80 92 e-mail: autopr@restec.ru		
22-24.03	Москва, Россия	10-я Юбилейная международная выставка и конферен- ция приборов и оборудования для неразрушающего кон- троля и технической диагностики в промышленности «NDT RUSSIA-2011»	OOO «ПримЭкспо» Tcя.: +7(812)380 60 02/00 e-mail: ndt@primexpo.ru, mera@primexpo.ru		
12-14.04	Екатеринбург, Россия	8-я Международная специализированная выставка «UralMetalExpo» и 2-я Международная специализирован- ная выставка «UralWeldExpo»	ВЦ «КОСК «Россия» Teл.: (495) 921 44 07 info@rtl-expo.ru		
19-20.04	Київ, Україна	Десята міжнародна н/т конференція «ПРИЛАДОБУДУ- ВАННЯ: стан і перспективи»	Тел.: (044) 454 95 47 e-mail: psnk@kpi.ua		
13-17.06	Созополь, Болгария	Дни неразрушающего контроля '11	Тел.: (+3592) 979 64 45 e-mail: nntdd@abv.bg		
6-9.09	Суммы, Украина	XIII Международная н/т конференция «Герметичность, ви- бронадежность и экологическая безопасность компрессор- ного оборудования «ГЕРВИКОН + НАСОСЫ»	Тел./факс: +38(0542) 33 35 94 e-mail: hervicon@sumdu.edu.ua		
Начало октября	Ялта, Крым, Украина	Девятнадцатая ежегодная международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушаю- щего контроля и технической диагностики»	Тел./факс: (044) 573 30 40 e-mail@conference.kiev.ua www.conference.kiev.ua		
1-3.11	Киев, Украина	15-я Международная выставка нефтегазовой промышлен- ности «НЕФТЬ и ГАЗ 2011»	www.oilgas-expo.com/ru		
4-6.11	Москва, Россия	Международная выставка «Aerospace Testing Russia 2011»	http://www.aerospace-expo.ru		
14-18.11	Івано-Франківськ, Україна	6-та Міжнародна науково-технічна конференція і виставка «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівно- го контролю і технічної діагностики машинобудівного та нафтогазового обладнання»	Тел.: (034)224 60 77		
29.11-01.12	Екатеринбург, Россия	11-я Международная специализированная выставка- конференция «Контроль и диагностика-2011» и «Свар- ка-2011»	Уральские выставки rushentseva@uv66.ru kirillova@uv66.ru		

КАЛЕНДАРЬ ВЫСТАВОК И КОНФЕРЕНЦИЙ по НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ в 2011 г.

ВИМІРЮВАННЯ ГЛИБИН КАНАВОК ЕТАЛОНА ЧУТЛИВОСТІ ЗА ЙОГО ЗОБРАЖЕННЯМ

Н. В. ОПИР, О. Р. БЕРЕГУЛЯК (Ів.-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу)

Розроблена методика вимірювання глибин канавок еталона чутливості за його рентгенологічним зображенням з використанням методів обробки зображень та розпізнавання образів. На основі різниці рівнів сірого отвору і оточуючого його фону встановлено відповідність між градаціями яскравості і глибиною канавок.

Measurement procedure of groove depth on X-ray image of perceptibility standard is shown by using image processing and pattern recognition. The correspondence between gray level and depth is establish based on the difference of hole and background gray level.

Застосування комп'ютерної техніки лля розв'язку задач радіографічного контролю зварних швів сприяє виявленню небезпечних дефектів, підвищенню достовірності контролю. Основний апарат, який при цьому використовується цифрова обробка зображень, а відправним пунктом для обробки зображення зварного шва є аналіз його ділянки, що містить калібрувальний еталон чутливості (КЕЧ). Згідно вимог стандартів, прийнятих для радіографічного контролю [1], КЕЧ встановлюють при кожному контролі на відстані не менше 5 мм від шва. Дефектоскопіст візуально оцінює степінь почорніння дефектів на зварному шві і встановлює їх глибинні параметри, співставляючи міру затемнення дефектів з певною канавкою КЕЧ. Такий підхід до визначення глибинних параметрів суб'єктивний і залежить від кваліфікації спеціалістів.

В роботі [2] описана методика автоматизованого визначення глибини канавок за їх зображенням в градаціях сірого, яка використовує усереднене значення яскравості канавок і оточуючого фону. Визначення глибини канавок — це задача вимірювання.

Глибина канавок визначається на основі співставлення зміни рівнів сірого на певних ділянках еталона на зображенні (рис. 1) і відомих їх метричних розмірів (рис. 2 та табл. 1) в напрямку рентгенівського випромінювання.

Дослідження проводили для еталона №1 [1] з параметрами, наведеними в табл. 1 (значення a, b, c, h, l — номінальні).



Рис. 1. Зображення канавкового еталона на екрані монітора



Рис. 2. Схематичне зображення канавкового еталона по ГОСТ 7512-85

Габлиця	1.	Параметри	еталона	<u>№1,</u>	MM

Глибина канавок						<i>R</i> , не		L		L	T
h_1	h_2	h3	h_4	h5	h_6	більше	а	D	С	n	L
0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	2,5	0,5	10	2	30

Встановимо відповідність градацій сірого чітко видимого отвору на зображенні канавкового еталона його глибині (половина висоти пластини).

Визначення глибини отвору еталона за його зображенням. Використаємо апарат обробки зображень для знаходження координат центру отвору x_0 , y_0 та його радіусу R в системі декартових координат з початком в центрі зображення. До обробленого оператором Канні [3] зображення еталона (рис. 3) застосуємо метод розпізнавання образів (перетворення Хафа з нечітким разбиттям і трикутними функціями нечіткої належності [4]).

Для застосування перетворення Хафа використовується параметричний запис рівняння кола:

$$(x-c)^{2} + (y-d)^{2} = r^{2},$$
(1)

де *с*, *d* — координати центра кола, *r* — радіус.

Тривимірний простір параметрів розбивається на нечіткі комірки [4]:

$$C_{ijk}^{r} = \left\{ ((c, d, r), \mu_{C_{ijk}^{r}}(c, d, r)) | (c, d, r) \in \mathbb{R}^{3} \right\},\$$

© Н. В. Опир, О. Р. Берегуляк, 2011

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 3. Зображення канавкового еталона, оброблене оператором виділення країв

де
$$\mu_{C_{ijk}^r}(c,d,r) = \begin{cases} \mu_{Rk}^f(r) \text{ при } c \in C_i, d \in D_j, \\ 0 \text{ в іншому випадку.} \end{cases}$$

Функція нечіткої належності $\mu_{Rk}^{f}(r)$ має трикутний вигляд.

Нехай x, y — точка контуру отвору, тоді для кожного c_i , d_j з рівняння (1) знаходимо точку параметричного простору (c_i , d_j , r_{ij}), яка належить більш ніж одній нечіткій комірці C_{lmn}^r Елемент матриці акумуляторів A(l, m, n) збільшується на величину $v_{lmn}(x, y) = \mu_{C_{ijk}^r}(c_i, d_j, r_{ij})$. Знаходячи локальний максимум матриці акумуляторів отримаємо параметри шуканого рівняння кола. Використання нечіткого розбиття простору параметрів забезпечує врахування невизначеності розташування точок контуру, що забезпечує точніше розпізнавання кола, що відповідає контурам отвору еталона, на зашумлених зображеннях.

Таким чином, використовуючи нечітке перетворення Хафа, визначаємо параметри отвору $(x_0 = c; y_0 = d; R = r).$

Область на відстані є від краю отвору не враховувалась при усередненні рівнів сірого як в середині отвору I_c , так і для обчислення фону навкруги отвору I_{fc} (для уникнення додаткової похибки через розмитість краю отвору):





Рис. 4. Нанесені краї еталона та області отвору і фону, по яким проводиться визначення глибинних параметрів

де $G(x(\rho, \theta), y(\rho, \theta))$ — рівень сірого в точці з координатами $(x(\rho, \theta), y(\rho, \theta))$ (початок полярної системи координат $\rho - \theta$, розташований в центрі круга — точці з координатами (x_0, y_0) ; N_c та N_{fc} кількість точок, що враховані при визначенні відповідно I_c та I_{fc} . На рис. 4 показано границі областей отвору

На рис. 4 показано границі областей отвору (внутрішнє коло) і фону навколо нього (два зовнішні кола), градації яких враховані при визначенні глибини отвору на еталоні, а також нанесені прямі, що виділяють контури еталона, параметри яких знаходяться за методикою [2].

Різниця рівнів сірого $\Delta I_c = I_{fc} - I_c$ на зображенні відповідає глибині отвору h/2.

Обчислення градацій сірого канавок та їх оточуючого фону. Ці характеристики визначаються на основі отриманих значень рівнів сірого вздовж еталона згідно методики [2]. Розподіл рівнів сірого I_r вздовж еталона показано на рис. 5.

Шукаємо місцезнаходження *i*-го локального мінімуму k_{\min}^i з умови:

$$I(k_{\min}^{i}) = \min_{id + \Lambda > r > id - \Lambda} I_{r},$$

де d і Δ — визначається відповідно в пікселях пропорційно геометричним розмірам a і b еталона (рис. 2).

Для обчислення значення рівнів сірого як характеристики *i*-ї канавки використовуємо усереднені значення рівнів сірого (в діапазоні [$-\varepsilon$, $+\varepsilon$]) в області локальних мінімумів вздовж еталона:

$$K_{\min}^{i} + \varepsilon$$

$$I_{k}^{i} = \sum_{r=k_{\min}^{i}-\varepsilon} I_{r} / 2\varepsilon,$$

де є в пікселях вибирають пропорційно *b*/2.

Обчислення градацій сірого оточуючого канавки фону проводили аналогічно як і для канавок відносно точок, розташованих на відстанях, пропорційних (a - b)/3 від країв канавок, ближче до



Рис. 5. Розподіл усереднених рівнів сірого вздовж еталона: 1 — градації сірого, що відповідають фону; 2 — канавкам

-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

очікуваних країв канавок (рис. 5). Таким чином визначали I_{fl}^i , I_{fr}^i — значення градації сірого фону відповідно зліва та справа від *i*-ї канавки. Значення фону відповідної *i*-ї канавки обчислювали

як їх усереднене значення: $I_f^i = \frac{I_{fl}^i + I_{fr}^i}{2}$.

Визначення глибини канавок. Глибина *i*-ї (*i* = 1...6) канавки визначається наступним чином:

$$H_i = \frac{\Delta I_{k_i}}{2\Delta I_c} h \text{ (MM), } \text{de } \Delta I_{k_i} = I_f^i - I_k^i \text{ .} \tag{3}$$

Канавковий еталон, який ми обробляємо, визначає 4 клас чутливості контролю [2], тому будемо оцінювати глибину перших чотирьох канавок. Для еталона, показаного на рис. 1, обчислимо глибини канавок (табл. 2) за запропонованою методикою та порівняємо їх з нормативними значеннями [1].

Аналізуючи результати, наведені в табл. 2 та графік на рис. 4, можна зробити висновки, що через нерівномірність освітлення (фон на КЕЧ не однаковий для постійної товщини пластини) та зашумленість зображення глибини канавок визначені зі значною похибкою. Згідно роботи [1] допустиме відхилення глибини канавок при виготовленні еталона для зразка, який досліджувався, становить

Таблиця 2. Глибини канавок, мм

Методика об-	Номер канавки								
числення	1	2	3	4					
ГОСТ 7512–85	0,6	0,5	0,4	0,3					
Запропонована методика	0,5531	0,4814	0,4051	0,3423					

0,05 мм. Для наведеного еталона і його зісканованого зображення (рис. 1) абсолютна похибка вимірювань знаходиться в допустимих межах. Однак отримати повторюваність результатів при наступних скануваннях не вдається, так як на вхідне зображення накладаються шуми. Тому в подальших роботах необхідно дослідити вплив шумів на результати вимірювань, можливість скорегувати нерівномірність освітлення на зображенні і підвищити точність вимірювань.

Висновки

Запропонована методика автоматизованого вимірювання метричних величин глибин канавок еталона чутливості за його рентгенологічним зображенням, що в значній мірі усуває суб'єктивний людський фактор. Результати досліджень можуть бути використані для вимірювання глибини дефектів за їх зображеннями.

Используя методы обработки изображений и распознавания образов, разработана методика измерения глубин канавок эталона чувствительности по его рентгенологическому изображению. На оснавании разности уровней серого отверстия и окружающего его фона установлено соответствие между градациями серого на изображении и глубиной канавок

- ГОСТ 7512–82. ДС Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод. — Введ. 01.01.84. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 32 с.
- 2. Компьютерная технология определения чувствительности рентгенографического контроля по изображению канавочного эталона / Р. А. Воробель, Н. В. Опыр, З. А. Бернык, О. Р. Берегуляк // Дефектоскопия. 2009. №5. С. 81–89.
- 3. Camy. J. F. A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 1986. — 8, № 6. — P. 679–698.
- Chatzis V., Pitas I. Fuzzy Cell Hough Transform for Curve Detection// Pattern Recognition. — 1997. — 30, № 12. — P. 2031–2042.

Надійшла до редакції 12.10.2009

Уважаемые авторы!

Редакция обращается к Вам с просьбой при подготовке статей учитывать требования постановления Президиума Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Украины от 15.01.2003 г. № 7-05/1 «О повышении требований к специальным изданиям, внесенным в перечень ВАК Украины», в соответствии с которым статья должна содержать такие необходимые элементы, как:

♦ постановка проблемы в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

формулировка целей статьи (постановка задания);

♦ изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов;

♦ выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ

А. Е. ОРЛОВИЧ, С. В. СЕРЕБРЕННИКОВ, А. И. СИРИКОВ (Кировоград. нац. техн. ун-т)

Представлен двухпараметрический метод электрического контроля степени загрязнения высоковольтных опорных изоляторов под рабочим напряжением, точность которого повышена за счет измерения активной и реактивной составляющих поверхностного тока утечки для определения площади сектора загрязнения на поверхности изолятора. В разработанной системе технической диагностики использован плавающий пороговый уровень тока утечки, зависящий от влажности воздуха, разности температур, сектора загрязнения и приложенного напряжения.

Represented by two-parameter method of electrical control pollution of high voltage insulators at an operating voltage accuracy is improved by measuring active and reactive components of the surface leakage current for determining the area of sector of pollution on the insulator surface. In the developed system of technical diagnostics used floating threshold leakage current depends on the humidity, temperature difference, the sector of pollution and the applied voltage.

При эксплуатации электроустановок систем электроснабжения загрязнение и увлажнение поверхности изоляции приводит к ухудшению ее изоляционной прочности. Это приводит к аварийному перекрытию, замыканиям на землю и несанкционированным отключениям потребителей, разрушению изоляции и токопроводников, потерь электроэнергии и другим негативным последствиям.

Наиболее распространенным организационнотехническим мероприятием по обеспечению надежной работы изоляторов является их периодическая регламентная очистка от загрязнений. Процесс накопления загрязнения на поверхности изолятора имеет сложный во времени характер и подвержен влиянию ряда случайных факторов. Поэтому во многих случаях регламентная очистка изоляции проводится преждевременно, а иногда с опозданием. Для диагностирования опасного уровня загрязнения и определения момента необходимости очистки созданы автоматизированные системы электрического контроля степени загрязнения изоляции под рабочим напряжением, основанные на измерении поверхностного тока утечки [1]. Недостатком этих систем является невозможность интерпретации результатов контроля в случае, если загрязнен лишь



Рис. 1. Схема замещения электрических процессов образования тока утечки загрязненного изолятора

© А. Е. Орлович, С. В. Серебренников, А. И. Сириков, 2011

некоторый продольный сектор боковой поверхности изолятора (секторное загрязнение), поскольку одному и тому же значению тока могут соответствовать разные его плотности (в зависимости от площади загрязнения) и разрядные напряжения. Кроме того, существующие системы диагностики не учитывают влияние нестабильности приложенного к изолятору напряжения, а также таких факторов окружающей среды, как температура и влажность.

Поэтому актуальной задачей является усовершенствование метода электрического контроля степени загрязнения высоковольтных изоляторов и разработка новой системы технической диагностики повышенной точности.

При горизонтальном расположении изолятора в шкафу комплектных распределительных устройств наружной установки (КРУН) наблюдается продольное секторное загрязнение его поверхности. С течением времени площадь сектозагрязнения постепенно увеличивается pa вплоть до полного загрязнения всей поверхности изолятора. Поэтому значение сектора загрязнения, по которому протекает ток утечки, в процессе контроля неизвестно. Неопределенность площади загрязнения исключает возможность коррекции результатов контроля путем простого выбора новых граничных уровней критического значения тока утечки.

Моделирование токов утечки. При приложении высокого напряжения $U_{\rm np}$ к загрязненному изолятору через него начинает протекать комп-

лексный ток утечки I_y , обусловленный объемными и поверхностными составляющими (рис. 1).

Комплексный ток утечки условно можно разложить на семь составляющих:

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

$$\begin{split} \dot{I}_{y} &= \dot{I}_{y0} + \dot{I}_{y\Pi} = \dot{I}_{y0} + (\dot{I}_{4} + \dot{I}_{5} + \dot{I}_{y\Pi3}) = \\ &= (\dot{I}_{1} + \dot{I}_{2} + \dot{I}_{3}) + (\dot{I}_{4} + \dot{I}_{5} + \dot{I}_{6} + \dot{I}_{7}), \end{split}$$

где \dot{I}_{y0} , $\dot{I}_{y\Pi}$ — объемный и поверхностный ток утечки; $\dot{I}_{y\Pi3}$ — поверхностный ток утечки от загрязнения; \dot{I}_1 — ток, обусловленный емкостью C_0 между фланцами через тело изолятора; \dot{I}_2 — ток активной проводимости твердого диэлектрика между фланцами R_0 ; \dot{I}_3 — ток абсорбции твердого диэлектрика; \dot{I}_4 — ток, обусловленный емкостью C_{Π} между фланцем изолятора с шиной и токосъемным кольцом через воздух и тело изолятора; \dot{I}_5 ток активной проводимости по поверхности чистого твердого диэлектрика; \dot{I}_6 — емкостный ток, который создается загрязнением и увлажнением поверхности; \dot{I}_7 — ток активной проводимости через загрязняющий слой на поверхности.

Объемный ток утечки I_{yo} не зависит от загрязнения, в то время как поверхностный ток утеч-

ки *I*_{уп} зависит от характера и степени загрязнения, поэтому является информативным параметром для контроля [2].

Вследствие загрязнения и увлажнения поверхность изолятора становится электропроводной, создавая электрическую емкость к токопроводящей шине и заземленным частям, поэтому поверхностный ток утечки через загрязняющий слой изменяется в функции продольной координаты *x* вследствие наличия токов смещения через воздух и тело изолятора. Это предопределяет при математическом моделировании тока утечки рассматривать схему замещения как цепь с распределенными параметрами в функции продольной координаты (рис. 2).

При разработке математической модели сделаны допущения, что погонные параметры: r_0 , которым моделируется степень загрязнения; C_1 —



— емкость к фланцу с токопроводящей шиной; C₂ — емкость к заземленному фланцу изолятора и заземленных частей, равномерно распределены по всей длине изолятора *H*. Это позволило получить упрощенную модель для качественного исследования параметров поверхностного тока утечки в конце изолятора решением системы дифференциальных уравнений:

$$-\frac{dU}{dx} = \dot{I}r_0,$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dx} = Uj\omega (C_1 + C_2) - Ej\omega C_1.$$
 (1)

Для решения системы (1) запишем начальные условия:

напряжение в начале изолятора (x = 0) равно фазному напряжению ($U = U_{np}$);ъ

На основании решения системы напряжение в конце изолятора, где находится токосъемное кольцо для выделения поверхностного тока утечки ($x \approx H$), равно нулю (U = 0).

На основании решения системы (1) при начальных условиях для тока частичное решение

I_{упз} представим выражением:

$$\dot{I}_{y\Pi3} = \left(\frac{j\omega E}{\beta} \left(C_2 - \frac{C_1 + C_2 e^{-\beta H}}{e^{-\beta H} - e^{\beta H}}\right)\right) e^{-\beta x} + \left(-\frac{j\omega E}{(e^{-\beta H} - e^{\beta H})\beta} (C_1 + C_2 e^{-\beta H})\right) e^{\beta x}, \qquad (2)$$

где $\beta = \sqrt{j\omega r_0} (C_1 + C_2)$ — коэффициент, который характеризует изменение тока вдоль оси опорного изолятора вследствие наличия токов смещения через воздух и тело изолятора.

Решение (2) в случае x = H имеет вид

$$\dot{I}_{\rm yrrs} = \frac{j\omega E}{\beta} (C_2 e^{-\beta H} - cth(\beta H) (C_1 + C_2 e^{-\beta H})).$$

Для получения более адекватной модели с целью количественного исследования параметров поверхностного тока утечки в конце изолятора и оценки степени приближения упрощенной модели необходимо учесть зависимость r_0 , C_1 , C_2 от текущей координаты x, что усложняет аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (1). Поэтому для их решения предложен приближенный метод, при котором поверхность изолятора разбивается на N элементарных ячеек с сосредоточенными параметрами (рис. 3). Предположим, что комплексный поверхностный ток утечки в начале изолятора I_1 известен, тогда напряжение U_1 будет:

$$U_1 = E - \dot{I_1} r_1$$

Рис. 2. Схема замещения загрязненной поверхности изолятора при распределенных параметрах

где r₁ — первый элемент массива сопротивлений r.



Рис. 3. Схема замещения поверхности изолятора при сосредоточенных параметрах

Вычислив напряжение U_1 , сможем найти ток I_2 :

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_1 + (E - U_1) j \omega C_{11} - U_1 j \omega C_{21}$$

где C_{11} и C_{21} — соответственно первый элемент массива емкостей к токопроводящей шине C_1 и заземленной плоскости C_2 , а затем, — остальные напряжения и токи:

$$\begin{split} U_2 &= U_1 - \dot{I}_2 r_2, \dot{I}_3 = \dot{I}_2 + (E - U_2) j \omega C_{12} - U_2 j \omega C_{22}, \\ U_3 &= U_2 - \dot{I}_3 r_3, \dot{I}_4 = \dot{I}_3 + (E - U_3) j \omega C_{13} - U_3 j \omega C_{23}, \\ & \dots \\ U_N &= U_{N-1} - \dot{I}_N r_N, \dot{I}_{N+1} = \\ &= \dot{I}_N + (E - U_N) j \omega C_{1N} - U_N j \omega C_{2N} \,. \end{split}$$

Напряжение в конце изолятора равняется ну-

лю, т. е. $U_N - I_{N+1}r_{N+1} = 0.$

Итак, решение системы уравнений (1) с учетом зависимости погонных параметров от текущей координаты *x* сводится к отысканию такого значения комплексного тока утечки в начале изолятора I_1 , при котором напряжение в конце (x = H) равняется нулю. Учитывая, что массивы r, C_1 и C_2 могут отображать любой характер изменения соответствующих параметров от продольной координаты x, предложенным методом возможно получить I = f(x), U = f(x) с учетом неравномерности распределения параметров схемы замещения.

Исследования погонных параметров. Изменение погонного сопротивления $r_0 = f(x)$ объясняется переменной кривизной поверхности изолятора. Если предположить, что загрязнение распределено в границах бесконечно малого сектора равномерно, то пределы изменения $r_0(x)$ можно оценить из отношения диаметров изолятора (1- $- D_{\min}/D_{\max}$)·100 % = (1 - 95/115)·100 % = 17 %. Минимальное значение r₀ можно найти из предельно допустимого (критического) поверхностного тока утечки, который для опорных изоляторов 10 кВ при равномерном загрязнении и увлажнении всей поверхности изолятора составляет 0,36 мА [3]. При критическом значении тока утечки перенапряжение, которое может возникнуть при замыкании на землю $(3, 2U_{\phi})$ приведет к перекрытию изолятора с вероятностью 50 %. Приняв $I_{\rm max} = 0,4$ мА, получим минимальное значение погонного сопротивления 125 кОм/мм. Максималь-



Рис. 4. График зависимости погонных емкостей от продольной координаты для изолятора ИОР-10-750-III при различных значениях сектора загрязнения: 1, 2 — соответственно полная поверхность к шине и плоскости; 3, 4 — соответственно 1/2 поверхности к шине и плоскости; 5, 6 — соответственно 1/4 поверхности к шине и плоскости

ное значение r_0 получим 5 МОм/мм, приняв $I_{\min} = 10$ мкА.

Учитывая сложность аналитического определения зависимости погонных емкостей $C_1 = f(x)$ и $C_2 = f(x)$ вследствие переменной кривизны поверхности изолятора и влияния встроенных фланцев, указанные зависимости найдены экспериментально. Соответствующие графики для изолятора ИОР-10-750-III приведены на рис. 4. Для изолятора ИОР-10-750-I характер зависимостей $C_1 = f(x)$ и $C_2 = f(x)$ аналогичен.

Для дальнейших расчетов получены эмпирические зависимости погонных емкостей от координаты x, которые аппроксимированы параболами. Адекватность полученных уравнений оценена коэффициентом множественной детерминации R^2 , который находится в пределах от 0,9535 до 0,9971. Расчет среднего значения относительной погрешности определения погонной емкости показал, что оно составляет 8,13 %.

Моделирование поверхностного тока утечки. По результатам моделирования поверхностного тока утечки с использованием упрощенной математической модели с равномерно распределенными параметрами сделаны следующие выводы:

 наличие секторного загрязнения незначительно влияет на активную составную тока утечки в конце изолятора;

– реактивная составная тока утечки в конце изолятора существенно зависит от величины сектора загрязнения, что позволяет использовать ее для определения площади сектора загрязнения на поверхности изолятора (величина сектора загрязнения S определяется отношением электропроводной площади загрязненного сектора к общей площади изолятора). Так, например, для изолятора ИОР-10-750-Ш при $r_0 =$ = 1 МОм/мм и при S = 1 реактивная составляющая поверхностного тока утечки в конце изолятора составляет 42 мкА, при S = 0,5—19 мкА, при S = 0,25—6 мкА (рис. 5).





Рис. 5. Графики зависимости реактивной составляющей поверхностного тока утечки в конце изолятора от погонного сопротивления при различных значениях сектора загрязнения (модель с равномерно распределенными параметрами): *1–3* — ИОР-10-750-I (соответственно полная поверхность; *1/2* и *1/4*); *4–6* — ИОР-10-750-III (соответственно полная поверхность; *1/2* и *1/4*)

Моделирование поверхностного тока утечки с учетом неравномерности распределения параметров позволяет сделать следующие выводы:

 как и в модели с равномерным распеределением параметров секторное загрязнение почти не влияет на активную составляющую тока утечки в конце изолятора;

2) прослеживается зависимость между значением реактивной составляющей в поверхностном токе утечки и сектором загрязнения (рис. 6).

Расхождение значений реактивных составляющих поверхностного тока утечки, вычисленных по обеим математическим моделям, показывает необходимость принятия более адекватной математической модели с учетом неравномерности распределения погонных параметров.

Зависимость реактивной составляющей от величины сектора загрязнения позволяет использовать угол сдвига фазы поверхностного тока утечки в качестве информативного параметра для контроля степени секторного загрязнения.

Для определения взаимосвязи сектора загрязнения с составляющими комплексного поверхностного тока утечки выполнен множественный нелинейный регрессионный анализ результатов математического моделирования с учетом неравномерности распределения погонных параметров. Полученные уравнения регрессии имеют вид: — для изолятора ИОР-10-750-I

$$S = 0,21073 I_{\rm p} - 1,8593 \cdot 10^{-4} I_{\rm a} I_{\rm p} + 4,4481 \cdot 10^{-7} I_{\rm a}^2 + 5,4231 \cdot 10^{-8} (I_{\rm a} I_{\rm p})^2,$$
(3)

для изолятора ИОР-10-750-III

$$S = -3,4372 \cdot 10^{-3}I_{a} + 0,27073 I_{p} + 6,4502 \cdot 10^{-6}I_{a}^{2} - 1,3651 \cdot 10^{-2}I_{p}^{2}, \qquad (4)$$

где *I*_a, *I*_p — соответственно активная и реактивная составляющая поверхностного тока утечки в конце изолятора; *S* — величина проводящего сектора.



Рис. 6. Графики зависимости реактивной составляющей поверхностного тока утечки в конце изолятора от погонного сопротивления (модель с неравномерно распределенными параметрами) (обозначения те же, что и на рис. 5)

Система технической диагностики. В основу разработанной системы технической диагностики положено уравнение преобразования, которое связывает первичные параметры (величину сектора загрязнения, температуру и влажность воздуха, температуру изолятора, приложенное напряжение) с критическим значением поверхностного тока утечки. Уравнение преобразования получено следующим образом. Обработкой результатов физического эксперимента получена статистическая зависимость поверхностного тока утечки от факторов окружающей среды и характеристик загрязняющего слоя, адекватность которой оценена коэффициентом $R^2 = 0,946$. Путем подстановки знчений парметров наиболее неблагоприятных факторов окружающей среды (W = 100 %, $t_{\rm H3} - t_{\rm B03} = -2^{\circ}{\rm C}$) и предельно допустимого тока утечки для равномерно загрязненного изолятора $(I'_{\rm kp} = 0,36 \text{ мA})$ определена максимально допустимая плотность ионообразующего вещества загрязнения ($\mu_{\rm kp}$ =0,466·10⁻²мг/см²) [3]. С учетом прямо пропорциональной зависимости Ікр от величины сектора загрязнения и приложенного напряжения, а также после подстановки $\mu_{\kappa p}$ в статистическую зависимость поверхностного тока утечки от факторов окружающей среды и характеристик загрязняющего слоя получено уравнение преобразования, которое имеет вид:

$$I_{\rm kp} = \frac{U}{U_{\rm H}} (1,58314 + 0,4249\,\Delta t + 0,0082938\,\Delta t^2 - (5))$$

$$-0,04723 W + 0,000333034 W^2 - 0,0050654 \Delta t W)S,$$

где U — фактическое значение приложенного к изолятору напряжения; $U_{\rm H}$ — номинальное значение фазного напряжения сети; $\Delta t = t_{\rm H3} - t_{\rm B03}$ разница между температурой изолятора $t_{\rm H3}$ и воздуха $t_{\rm B03}$, °С; W — относительная влажность, %.

Принцип работы системы технической диагностики степени загрязнения состоит в следующем (рис. 7).

Для разделения поверхностного тока утечки на составляющие к блоку *1* подается опорное фазное

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 7. Блок-схема системы технической диагностики степени секторных загрязнений поверхности высоковольтных опорных изоляторов под рабочим напряжением: 1 — блок определения активной и реактивной составляющей поверхностного тока утечки; 2 — блок вычисления величины сектора загрязнения; 3 — блок датчиков влажности и температуры; 4 — блок определения критического тока утечки; 5 — блок сравнения; 6 — блок сигнализации



Рис. 8. Функциональная схема измерительного устройства

напряжение сети U_c от трансформатора напряжения TV и поверхностный ток утечки I_{yn} . В блоке I определяется угол сдвига фаз между U_c и поверхностным током I_{yn} , а по его значению — соответственно активная I_a и реактивная I_p составляющие I_{yn} , которые приводятся к номинальному напряжению сети по значению U_c . Далее в блоке 2 происходит определение величины сектора загрязнения S по значения I_a и I_p соответственно выражениям (3) или (4). Значения S вместе с величиной влажности окружающего изолятор воздуха W и температуры $t_{воз}$, а также температурой изолятора $t_{из}$, от блока датчиков 3 и напряжением U_c подается в блоке 4 для определения критического тока утечки I_{kp} из уравнения преобразования (5).

Для диагностирования опасного уровня загрязнения необходимо сравнить полученный $I_{\rm kp}$ с тем, что протекает в данное время $I_{\rm yn}$. Возможны два случая:

при $I_{\rm kp} \leq I_{\rm yn}$ уровень загрязнения критический и в ближайшее время необходимо провести очистку изоляции;

при $I_{\rm kp} > I_{\rm yn}$ запас изоляционной прочности достаточен и изоляторы могут эксплуатироваться и дальше без очистки.

Если система определяет опасный уровень загрязнения, то оповещает обслуживающий персонал через средства сигнализации 6. В случае работы подстанции без обслуживающего персонала сигнал из блока 5 поступает в телемеханический канал связи, который оповестит центральный диспетчерский пункт об опасном уровне загрязнения на данной подстанции [4].

На рис. 8 приведена функциональная схема разработанного прибора, который является частью предложенной системы технической диагностики и измеряет следующие величины: фазу поверхностного тока утечки; амплитудные значения первых гармоник приложенного к изолятору напряжения и тока утечки; влажность и температуру окружающего изолятор воздуха; температуру изолятора.

Основной элемент измерительного устройства микроконтроллер ATmega16. Измерение температур осуществляется цифровыми датчиками DS18B20 с дискретностью 0,1 °С при абсолютной погрешности измерения ±0,5 °С. Измерения влажности осуществляется аналоговым датчиком влажности HIH-4000-003 с точностью ±0,5 %. Для отображения измеренных величин используется информационная LCD-панель. В разработанном макете прибора учтена возможность нелинейных искажений приложенного к изолятору сетевого напряжения и тока утечки, для этого использован ортогональный метод определения угла сдвига фаз с цифровой обработкой сигналов. Прибор предусматривает возможность подключения к ПК через интерфейс RS-232 для дальнейшей обработки измеренных величин.

Выводы

На основе анализа методов контроля степени загрязнения изоляторов под высоким напряжени-

ем установлено, что необходимо усовершенствовать метод электрического контроля путем учета площади сектора загрязнения, влияния влажности и температуры воздуха, температуры изолятора, отклонения рабочего напряжения.

Анализ характера тока утечки через загрязненный изолятор выявил в поверхностном токе реактивную составляющую, которая возникает за счет электропроводной электрической емкости вследствие загрязнения поверхности.

На основе математической модели процессов протекания комплексного поверхностного тока утечки в слое загрязнения на поверхности изолятора исследованы параметры тока, которые позволяют вычислять составляющие тока в зависимости от величины сектора загрязнения. Малые значения угла сдвига фазы тока (до 0,1°) обусловливают требование высокой чувствительности системы технической диагностики при измерении фазы.

Получено выражение для вычисления величины сектора загрязнения по активной и реактивной составляющим поверхностного тока утечки, что позволило повысить точность электрического метода контроля путем перерасчета значения критического тока утечки пропорционально величине сектора загрязнения.

Получено уравнение преобразования для критического поверхностного тока утечки в зависимости от разницы температур между изолятором и воздухом, относительной влажности воздуха, рабочего напряжения и величины сектора загрязнения, которое позволяет рассчитать предельно допустимый поверхностный ток утечки, с учетом их влияния и определять своевременность очистки изоляции.

Разработана блок-схема системы технической диагностики степени секторных загрязнений высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением, которая в отличие от существующих использует усовершенствованный метод электрического контроля по комплексному значению поверхностного тока утечки с учетом факторов окружающей среды и отклонения рабочего напряжения.

- 1. Котиш А. І., Орлович А. Ю., Серебренніков С. В. Автоматизована система контролю за станом ізоляції в повітряних мережах напругою 10...35 кВ // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — №4. — С. 62–65.
- Серебренніков С. В., Сіріков О. І. Вибір інформативних параметрів для контролю забрудненості високовольтних ізоляторів: Зб. наук. праць. — Львів: Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2006. — Вип. 11. — С. 224–229.
- Орлович А. Ю., Плешков П. Г., Серебренніков С. В., Сіріков О. І. Визначення критичного струму витоку для контролю секторних забруднень високовольтних ізоляторів: Загальнодержавний міжвідомчий наук.-техн. зб. «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин» — Вип. 40. — Ч. II. — Кіровоград: КНТУ, 2010. — С. 210–214.
- Козловский О. А., Орлович А. Е., Серебренников С. В. Автоматизированная система прогнозирования разрушающих атмосферных нагрузок на элементах конструкций воздушных линий электропередач // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 2. — С. 46–48.

Поступила в редакцию 15.12.2010

вниманию специалистов!

Книга «Неразрушающий контроль в Украине»

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

Книга будет включать следующие разделы:

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

Объем издания – ориентировочно до 300 стр. формата 70×100/16. Тираж 1000 экз.

Предлагаем Вам разместить в книге информационные и рекламные материалы о предприятиях, разработках, услугах и пр. Вы также можете заказать необходимое количество экземпляров.

Тел.: (044) 287-26-66; тел./факс: (044) 289-21-66; e-mail: ndt@paton.kiev.ua

ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Н. Ф. ХОРЛО, Н. А. СЕРГЕЕВА (МЦНК ОАО ПТП «Укрэнергочермет», Харьков)

Проведен анализ структуры тематических программ по специальной подготовке специалистов по неразрушающему контролю в соответствии с CEN ISO/TR 25107. Рассмотрена целесообразность и возможность внедрения динамического подхода к организации проведения специальной подготовки на основании единого интегрированного курса подготовки по методу НК. Предложен вариант практической реализации динамического подхода к организации проведения специальной подготовки и продемонстрированы его преимущества.

The analysis of structuring of thematic programs of special training of experts of nondestructive testing according to CEN ISO/TR 25107 is carried out. The expediency and possibility of introduction of the dynamic approach to the organization of carrying out of special training on the basis of the uniform integrated course of training on method NDT is considered. The variant of practical realization of the dynamic approach to the organization of special training out is offered and its advantages are shown.

Новая версия европейского стандарта EN 473: 2008 [1] существенно отличается от предыдущих вариантов стандарта EN 473 версий 1992 и 2000 гг. Переработке и совершенствованию подвергнуты все основные аспекты процедуры сертификации персонала, занятого в неразрушающем контроле (HK). В работе [2] подробно рассмотрены основные отличия версий 2000 и 2008 гг. стандарта EN 473 в части требований к подготовке персонала. Основные выводы, вытекающие из проведенного анализа, заключаются в следующем:

 новая версия стандарта устанавливает четкие нормативные требования к организациям (учебным центрам), проводящим подготовку персонала [3];

 – регламентированы нормативные требования к содержанию учебных программ [4];

 существенно изменились минимальные объемы специальной подготовки по методам НК (табл. 1) и включена обязательная подготовка на третий квалификационный уровень.

Тематические программы подготовки в соответствии с CEN ISO/TR 25107 [4] содержат разделы учебного курса с указанием количества часов теоретических и практических занятий по каждому разделу. При этом общее количество часов подготовки превышает установленный минимум согласно EN 473: 2008 по 2-му и 3-му уровням квалификации. Следовательно, прямое использование данных учебных программ возможно только в случае, если Орган по сертификации персонала (ОСП) принимает решение превысить количество часов подготовки по сравнению с установленным минимумом EN 473: 2008. В противном случае, если ОСП придерживается точного соответствия стандарту, необходимо определенным образом трансформировать объем подготовки для

	Метод НК	1-й ур	овень	2-й ур	овень	3-й у	ровень
		EN 473: 2000	EN 473: 2008	EN 473: 2000	EN 473: 2008	EN 473: 2000	EN 473: 2008
AT		40	64	64	64	-	48
ET		40	40	40	40	-	40
LT	А (базовые знания)	8	8	16	8	-	8
	В (контроль давлением)	14	16	28	24	-	24
	С (газоаналитический контроль)	18	16	36	32	-	32
MT		16	16	24	24	-	32
PT		16	16	24	24	-	24
RT		40	72	80	80	-	72
UT		40	64	80	80	-	72
VT		16	16	24	24	-	24
Базон	вые знания (для прямого допуска на	3-й уровень)	•	-	80		

Таблица 1. Минимальные объемы подготовки по методам НК

© Н. Ф. Хорло, Н. А. Сергеева, 2011

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

приведения суммарного количества часов к установленному в EN 473:2008. Это решение ОСП будет легитимным, поскольку стандарт устанавливает только соответствие содержания программ подготовки требованиям CEN ISO/TR 25107.

Таким образом, современные минимальные требования к продолжительности подготовки кандидатов, как они изложены в стандарте EN 473: 2008, показаны в табл. 2. При этом указанная продолжительность подготовки включает как практический, так и теоретический курс.

Стандарт EN 473: 2008 не содержит конкретных требований к базовому образованию кандидата. Документ устанавливает лишь то, что кандидат должен владеть адекватными математическими знаниями и полученными ранее сведениями о материалах и процессах. Таким образом, сознательно нивелируя требования к базовому образованию кандидата, стандарт одновременно четко регламентирует требования к его специальной подготовке.

Проведя анализ структурного построения тематических программ подготовки в соответствии с CEN ISO/TR 25107, видим что любая тема, начиная с 1-го по 3-й уровень формируется по накоплению — от достигнутого на предыдущем уровне. На рис. 1 представлен фрагмент программы по ультразвуковому (UT) методу НК, который наглядно демонстрирует данный принцип построения программ.

Такое структурное построение программы позволяет осуществлять специальную подготовку кандидатов как по отдельным квалификационным уровням, так и интегрированную подготовку кандидатов с 0 на 3-й уровень. Последнее обстоятельство становится весьма актуальным по многим причинам. Во-первых, как видно из табл. 2, количество вариантов курсов подготовки конкретного кандидата по определенному методу — как минимум 5, а с учетом определенных условий (см. примечания а-д к табл. 2) их становится больше в несколько раз. Это, в свою очередь, влечет за собой разработку учебным центром множества отдельных (стационарных) программ специальной подготовки, рассчитанных на конкретные часы подготовки. Во-вторых, это значительно усложнит работу преподавателей учебных центров, вынужденных постоянно вникать в особенности большого количества учебных программ подготовки и, как следствие, приведет к снижению качества преподавания. В-третьих, такое «распыление» специальной подготовки на большое количество отдельных курсов приведет и к раздроблению количества кандидатов, изучающих данный конкретный курс подготовки, и как следствие, индивидуальное обучение приведет к удорожанию стоимости работ для заказчиков услуг по специальной подготовке.

Таким образом, организация проведения специальной подготовки кандидатов с помощью отдельных программ, разработанных в точном соответствии с часами подготовки, назначенными Органом по сертификации в результате экспертизы заявительных документов кандидата, становится нецелесообразной. Выходом из создавшегося положения может стать внедрение *динамического подхода* к организации проведения специальной подготовки. Сущность данного подхода



Рис. 1. Фрагмент учебной программы специальной подготовки по UT методу

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Таблица 2. Требования к продолжительности подготовки кандидатов, ч

	Метод НК	1-й уровень, b, e, g	2-й уровень, a, b, e, g	3-й уровень, е, д
AT		64	64	48
ET		40	40	40
LT	А (базовые знания)	8	8	8
	В (контроль давлением)	16	24	24 ^{<i>c</i>, <i>d</i>}
	С (газоаналитический контроль)	16	32	32 ^{<i>c,d</i>}
MT		16	24	32
РТ		16	24	24
RT		72	80 ^f	72 ^{c, d}
UT		64	80	72 ^{c, d}
VT		16	24	24
Базов	вые знания (для прямого допуска на 3-й уровень)	_	_	80

Примечания:

а — для допуска к экзаменам сразу на 2-й уровень необходима общая продолжительность подготовки, установленная для 1- и 2-го уровней;

b — продолжительность подготовки может быть сокращена до 50 %, если сертификацию ограничено:
 – в применении (например, автоматизированные методы ЕТ, МТ, UT листов, труб, прутков, или толщинометрия, либо контроль расслоений прокатанного стального листа);

- в методике (например, из всех способов RT метода применение только радиоскопии);

- для RT и UT методов — 1-й уровень только в одном секторе продукции;

с — продолжительность подготовки может быть сокращена до 50 %, если кандидат сертифицирован на 2-й уровень по этому методу;

d — до 50 % необходимой продолжительности подготовки можно достичь через практические занятия, согласованные с органом по сертификации;

e — орган по сертификации может принять решение о сокращении до 50 % необходимого общего количества часов подготовки для тех кандидатов, которые окончили технический колледж или университет, или же имеют не менее двух лет инженерного или научного образования, полученного в колледже или университете;

f— если сертификация ограничена до расшифровки снимков или только одного сектора продукции, минимально необходимая продолжительность подготовки для непосредственного допуска составляет 56 ч. Примечание «a» не действует;

g — максимальное сокращение может быть на 50 %.

заключается в преподавании учебным центром единого интегрированного курса специальной подготовки по методу НК, разработанного на основании программ CEN ISO/TR 25107, и охватывающего подготовку с 0 до 3-го квалификационного уровня включительно. При этом кандидаты обязаны посещать в обязательном порядке только те часы занятий, где будут излагаться разделы учебного плана, входящие в обязательный перечень тем, назначенных кандидату органом по сертификации по результатам экспертизы его заявительных документов.

Как пример реализации динамического подхода к организации проведения специальной подготовки на рис. 2 приведен фрагмент, разработанный на основе программы подготовки по UT методу в соответствии с требованиями CEN ISO/TR 25107, совмещающий в себе учебный план и журнал учета посещения занятий. Как видно из данного примера, учебная группа состоит из кандидатов, которые проходят подготовку на разные квалификационные уровни, и при этом имеют неодинаковый начальный квалификационный уровень. Данное построение учебного плана подготовки позволяет преподавателю легко отслеживать посещаемость занятий кандидатами для изучения конкретных разделов и тем учебного плана. При этом становится очевидным и тот факт, что кандидат слушает курс подготовки, в котором есть темы обязательные и необязательные к посещению, т. е. в его графике курса подготовки есть временные «окна», свободные от занятий. Контроль со стороны преподавателя осуществляется проверкой знаний кандидатов после прохождения каждой темы учебной программы в соответствии с требованиями CEN ISO/TR 25108: 2006, раздел 7 [3]. Для того, чтобы кандидат четко ориентировался в процессе обучения, необходима разработка индивидуального графика для слушателя специальной подготовки. Практическая реализация подобного графика представлена в табл. 3.

В сводной таблице, размещенной в конце учебного плана, указаны итоговые данные о количестве усвоенных кандидатом часов теоретической и практической подготовки — отдельно по каждому уровню и суммарно на протяжении всего курса подготовки. Данная информация, дополненная указанием тем учебного плана, является чрезвычайно актуальной для Органа по сертификации, так как позволяет дифференцированно проводить экспертную оценку уровня подготовки кандидата не только по количеству часов подготовки, но и отслеживая часы по усвоению конкретных тем программы подготовки. В табл. 4 приведен при-

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

мер записи данной информации как приложение к свидетельству о специальной подготовке кандидата.

Данные табл. 4 могут быть в дальнейшем использованы органом по сертификации при проведении анализа или экспертизы для вынесения решения о минимальном количестве часов подготовки кандидата:

- при переходе в другой сектор;

 при сертификации на следующий квалификационный уровень;

- при сертификации по другому методу НК;

– при переэкзаменовке кандидата, не набравшего проходной балл на квалификационном экзамене.

Таким образом, изложенная концепция динамического подхода к организации проведения специальной подготовки одновременно решает несколько задач:

 деятельность учебного центра осуществляется путем организации обучения по программе полного курса подготовки с 0 на 3-й квалификационный уровень. Нет необходимости разработки большого количества курсов подготовки, рассчитанных под конкретного кандидата. Работа преподавателей учебного центра становится более стабильной и ритмичной, и как следствие в перспективе более качественной и прослеживаемой;

 посещение занятий специальной подготовки кандидатами становится более демократичным, т. е. каждый кандидат, предварительно ознакомившись со своим индивидуальным расписанием занятий, может планировать свою производственную деятельность. При этом остается контроль учебным центром посещений занятий и оценивание уровня усвоения материала преподавателем;

 за счет однообразия курса подготовки, проводимого учебным центром, частота повторяемости занятий во времени возрастает. Это дает возможность кандидату, пропустившему занятие по уважительной причине или плохо усвоившему материал, быстро пройти повторно необходимый раздел учебной программы;

 повышается эффективность работы учебного центра — так как за счет универсальности курсов подготовки их наполняемость кандидатами возрастает, что положительно влияет на финансовое

Программа			Разделы	1-й уровень квалификации	1	ŧ	2-й уровень квалификации	1	ŧ	3-й уровень квалификации	16	1				
node	ion	104	ĸu	_	_	учебного плана	Содержание разделов учебного плана подготовки	Decem	Timeso	Содержание разделов учебного плана подготовки	Deceo	1	Содержание разделов учебного плана подготовки	Tenano		
						Вандания, терминология и история НК	Sazawa HR Parginsen Verspass HR Tagawasannes HK (Shi 1300-1, 2) Uringas UT Tagawasannes UT (Shi 1300-4)	7	1,00	Otoop anamek gen 1-re yezane Tagenerichtres e trigegeneriskrissertek nij UT	7	0,75	Теренскоппи и спределения понтий по UT Обща стядартие ISO, CEN и надиональных собщее и на продукцие!	T 1,25		
OND BIRDING BIRD	144	Vpoe	1	I		ентрикаданаласын (втингласав)	Дата проведлиния обучения по разделу программы	01	0 2000	Дага проведлиния обучения по разделу программы	On Not	-	Дата проводения обучения по раздалу программы	Onwenta B recesar-	Rpochy- used secon I	Подлись претода- вателя
Haarca H.H.		• •	+	-	+ +	Горбенно В.Н.	2 ангуста 2010 r.		•	2 aerycra 2010 r.		+	2 awrycts 2010 r.	+0	1,00	0
Петров П.П.		- +		-		Горбенко В.Н.	2 awrycta 2010 r.		•	2 aerycra 2010 r.		•	2 ангуста 2010 г.	10.276	1,75	0
Ceappoe C.C.				+		Горбенко В.Н.	2 августа 2010 г.			2 aerycra 2010 r.		•	2 aerycta 2010 r.		3.00	0
Cevelous C.C.		. +	+	•	- +	Горбенко В.Н.	2 serycts 2010 r.		+	2 aerycra 2010 r.		•	2 aeryc1a 2010 r.	+	0.75	0
POMHOS P.P.		- +	+	+	• -	Горбенко В.Н.	2 августа 2010 г.		+	2 aarycta 2010 r.		+	2 awrycta 2010 r.		2,00	0
Bacenee B.B.		• •	. 7	-	. 2	Горбенко В.Н.	2 aerycta 2010 r.		τ.	2 августа 2010 г.			2 aerycta 2010 r.		1,25	0
Журна зан Своднаа резул	817 1087 1167	mad mad	ma 100	2	Componentingencies of transformation Componentingencies of transformation Componentingencies Comp		Те на, че а дин 2 не рекент мнос Менертини и конструпное катарала Менертини конструпное катарала Менертини конструпное и разлики Сольские избод окросние и разучие самотовие изприме	T 14,5								
GHO sandrigata	100	Vpoint I I	V	1 1	1	енопанадоледо СМФ (атнепонсов)	Дата проведения обучения по разделу программы	- 8 9	0 2005	Дата проводения обучения по раздалу программы	0 8	0 00000	Дата проводении обучении по раздялу программы	Onserva R ROOMUS-	Record used vecos. I	Подлись пренода- вателя
Vision VI.H.		• +	1	+	+ +	Горбенко В.Н.	2-3 asrycts 2010 r.		1.	3-5 awycra 2010 r.	+	1+1+	5-6 aarycra 2010 r.	+/+	10,50	0
Петров П.П.		- +	+	1.		Горбенер В.Н.	2-3 asrycts 2010 r.		10	3-5 aarycra 2010 r.	•	* * *	5-6 sarycta 2010 r	-1-	24.00	0
Ceanpole C.C.	-	• •		M	+ +	Горбенер В.Н.	2-3 aerycta 2010 r.		1+	3-5 amycra 2010 r.	+/	*/*	5-6 aerycra 2010 r.	+/+	38.50	0
Centros C.C.	-	• +	-		+ +	Горбенко В.Н.	2-3 serycta 2010 r.		1-	3-5 services 2010 r.		*/*	5-6 aerycra 2010 r.	+1+	13.50	0
POMHOR P.P.	-	+	+	+	• +	Горбенко В.Н.	2-3 aerycta 2010 r.		1.	3-5 servicta 2010 r.	+/	+1+	5-6 aerycra 2010 r.	+/+	28,00	0
Bacenses B.B.		• •		+	1.	Горбенио В.Н.	2-3 aerycta 2010 r.		·!-	3-5 anycra 2010 r.	1.0	1-1-	5-6 aerycre 2010 r.	+/+	14.50	0
					1				•••	••••]	
ено кананана	100	Vpce I]	-	T I	1	I пройденных часов слециальной подготовки	Vpceess 1	10	#1875 1075. 1008	Vpoters 2	412	HTEPS ICTS. ICOR	Уровень 3	Длигель ность, чесое	Rpocry- uated vacos, I	E you wante faccoluir instruct (and II (present)
Vance V.H.		• •		+	4 4	64,00	Теоретические занятия (T) Практические занятия (T)	3	9.25 4.75	Теоретические занятии (T) Практические занятия (T)	1	0.00	Теоретические занятия (T) Прастические занятия (П)	0.00 0.00	39.25 24.75	
Respondence		. +				144.00	Teoperandosse sanstan (T)	3	9.25	Tespennecuse saustium (T)	4	8.25	Teoperanecisie savetses (T)	0.00	87.50	
	+	-		+	-		Teoperarecove savement (1)	3	125	Teoperterective savettex (T)	1	4.25	Telecter-ecore sevence (1)	47.50	135.00	
Calgopoa C.C.	1	• +	+	*	* +	216,00	Практические занятия (П)	3	4.75	Практические зачетия (П)	3	1,75	Практические занятия (П)	24.50	81.00	144,00
Centros C.C.						80.00	Теоретические занятия (T)	1	00.0	Teoperaneouse saustrus (T)	4	8,25	Teopera-dosie savatives (T)	0.00	48.25	
-	+	-	-		-		Tipacterences assertes (T)	1	1.00	Total Terretore advertise (T)	1 2	1,75	Tooresteedcase assesses (T)	47.50	31,75	
POMarica P.P.			-	1	• •	152,00	Прагленерия занятия (П)	t	00,0	Практические занятия (П)	3	1.75	Практические занятии (П)	24.50	56.25	80.00
Bacaraus 0.0			1.			72.00	Теоретические занятия (T)	1	00.0	Теоретические занятия (T)	1	00.0	Теоретические заинтии (T)	47,50	47,50	
and the second second			1				Практические зачития (П)	0	00,00	Ream-ecore seamer (II)	1	0,00	Практические занития (П)	24,50	24,50	1.21

Рис. 2. Фрагмент практической реализации динамической программы специальной подготовки кандидатов по UT методу

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, №1,2011

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ —

Т

Т

Таблица 3. График проведения специальной подготовки Начало подготовки: 02 августа 2010 г. Окончание подготовки: -----

День	Дата	№,	ФИО кандидата		Уро	овень по	одготон	вки	1	Тема	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
		п/п		0→1	0→2	0→3	1→2	1→3	2→3				
		1	Иванов И.И.	+						1. Введение,	9.00-10.00	-	_
		2	Петров П.П.		+					терминология и	9.00-10.00	10.00-10.45	_
		3	Сидоров С.С.			+				история ПК	9.00-10.00	10.00-10.45	10.45-12.00
		4	Семенов С.С.				+				_	10.00-10.45	_
	02.08.2010	5	Романова Р.Р.					+			_	10.00-10.45	10.45-12.00
1		6	Васильев В.В.						+		_	-	10.45-12.00
		1	Иванов И.И.	+							13.00-18.00	-	_
		2	Петров П.П.		+						13.00-18.00	_	_
		3	Сидоров С.С.			+					13.00-18.00	-	_
		4	Семенов С.С.				+				_	Ι	_
		5	Романова Р.Р.					+			_	_	_
		6	Васильев В.В.						+		_	_	_
		1	Иванов И. И.	+						2. Физические	9.00-14.30	-	_
2 03.08		2	Петров П. П.		+					принципы метода	9.00-14.30	15.30-18.00	_
	03.08.2010	3	Сидоров С.С.			+				знания	9.00-14.30	15.30-18.00	_
		4	Семенов С.С.				+				_	15.30-18.00	_
		5	Романова Р.Р.					+		-	_	15.30-18.00	_
		6	Васильев В.В.						+		_	-	_
	-	1	Иванов И. И.	+							_	9.00-13.00, 14.00-18.00	-
		2	Петров П. П.		+						_	9.00-13.00, 14.00-18.00	-
3	04.08.2010	3	Сидоров С.С.			+					_	9.00-13.00, 14.00-18.00	-
		4	Семенов С.С.				+				_	9.00-13.00, 14.00-18.00	-
		5	Романова Р.Р.					+		-	_	_	_
		6	Васильев В.В.						+	-	_	_	_
		1	Иванов И. И.	+							_	9.00-12.00	_
		2	Петров П.П.		+						_	9.00-12.00	13.00-18.00
4	05.08.2010	3	Сидоров С.С.			+					_	9.00-12.00	_
		4	Семенов С.С.				+				_	9.00-12.00	13.00-18.00
		5	Романова Р.Р.					+			_		13.00-18.00
		6	Васильев В.В.						+		_	Ι	_
		1	Иванов И. И.	+							_	_	-
		2	Петров П.П.		+						_	_	_
	06.08 2010	3	Сидоров С.С.			+					_	-	9.00-13.00, 14.00-18.00
5		4	Семенов С.С.				+				_	_	-
		5	Романова Р.Р.					+			_	_	9.00-13.00, 14.00-18.00
		6	Васильев В.В.						+		_	_	9.00-13.00, 14.00-18.00

метод НК:

UT

٦

Таблица 4. Приложение к свидетельству специальной подготовки кандидата Перечень тем, прослушанных специалистом во время специальной подготовки

Название темы	Продолжительность, ч.
Введение, терминология и история НК	
Физические принципы метода и соответствующие знания	
Знание продукции и соответствующих возможностей метода и производственных способов	
Оборудование	
Сведения, необходимые перед проведением контроля	
Контроль	
Оценивание и оформление результатов	
Оценка качества объекта контроля	
Аспекты качества продукции	
Разработки	
Общая продолжительность	
теоретических занятий:	
практических занятий:	
Всего:	

состояние центра, что приводит к усилению его материально-технической базы и улучшению преподавательского уровня.

В заключение несколько слов о курсе специальной подготовки «Базовые знания» (для прямого допуска на 3-й уровень) в объеме 80 ч, регламентированном в стандарте EN 473 редакции 2008 г. В соответствии со стандартом [1], программы специальной подготовки должны соответствовать CEN ISO/TR 25107, однако данный нормативный документ [4] не содержит программы подготовки, соответствующей курсу «Базовые знания». При этом стандарт [4] только говорит о том, что прямой допуск на 3-й уровень требует общей длительности обучения, которое предусмотрено для 1- и 2-го уровней. Исходя из этого, допустимо интерпретировать курс «Базовые знания» как курс подготовки на 1- и 2-й уровни суммарно.

Однако табл. 2 наглядно демонстрирует, что для поверхностных методов (МТ, РТ, VT, LT) суммарная продолжительность на 1- и 2-й уровни недостаточна для выполнения требований стандарта [1] к продолжительности курса «Базовые знания» на 3-й уровень. При внедрении в учебном центре изложенного выше подхода к проведению специальной подготовки кандидат сможет свободно «добрать» недостающие часы, прослушав отдельные темы (например, «Физические принципы метода») по тем объемным методам НК (UT или RT), которые будут выбраны им в дальнейшем для включения в часть «С» базового экзамена.

- EN 473: 2008 Non-destructive testing. Qualification and certification of NDT personnel. General principles / European Standard. Final Draft / 01-Feb-2008 / 36 pages. Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала, занятого в неразрушающем контроле. Общие принципы. / Европейский стандарт. Окончательная редакция / 1.02.2008 г./ 36 с.
- Хорло Н. Ф., Сергеева Н. А. Структурное формирование базы экзаменационных вопросов квалификационного экзамена для сертификации специалистов неразрушающего контроля по процедуре EN 473 / Материалы 17-й Международ. конф. «Современные методы и средства НК и ТД», 2009, Ялта.
- CEN ISO/TR 25108: 2006 Non-destructive testing Guidelines for NDT personnel training organizations (ISO/TR 25108:2006) / International Organization for Standardization (Technical Report) / 01-Jul-2006 / 18 р. Неразрушающий контроль. Руководство по организациям, проводящим подготовку персонала по неразрушающему контролю / Стандарт ИСО / 01.07.2006 / 18 с.
- CEN ISO/TR 25107: 2006 Non-destructive testing Guidelines for NDT training syllabuses (ISO/TR 25107:2006) / International Organization for Standardization (Technical Report) / 01-Jul-2006 / 78 р. Неразрушающий контроль. Руководство по программам подготовки в области НК / Стандарт ИСО / 01.07.2006 / 78 с.

Поступила в редакцию 30.08.2010 ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

ПІДСУМКИ КОНКУРСУ УТ НКТД СЕРЕД СТУДЕНТІВ НА КРАЩУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Підведені підсумки творчого конкурсу, проведеного УТ НКТД серед студентів вищих навчальних закладів, що захистили в 2010 р. дипломні роботи з розробки методів і приладів неруйнівного контролю.

Конкурс присвячений 20-річчю Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики і відбувався в період з червня по вересень 2010 р.

Ініціатори проведення цього конкурсу мали на меті:

оцінити рівень підготовки в Україні фахівців
 в галузі НК і ТД;

• сприяти підняттю престижу кафедр, що готують спеціалістів даного профілю;

• дати можливість студентам, що закінчують навчання, відчути інтерес до них як професіоналів в галузі НК і ТД з боку потенційних роботодавців.

До участі в конкурсі були запрошені студенти профільних кафедр українських вузів: кафедр методів та приладів контролю якості; технічної діагностики та моніторингу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ); приладів і систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»; кафедри приладів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; радіоелектронної автоматики Дніпропетровського національного університету, кафедри приладів і методів неруйнівного контролю Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; інформаційновимірювальних систем Національного авіаційного університету та інших університетів України.

Вперше в історії професійних конкурсів УТ НКТД крім дипломів на переможців конкурсу чекали і спеціальні нагороди. Це стало можливим завдяки спонсорській підтримці.

Так, спеціальний приз за перше місце – ноутбук – був наданий компанією «ОНІКО» (Київ), одним із провідних вітчизняних постачальників засобів НК. Спонсором нагороди за друге місце – забезпечення безкоштовної участі і доповіді молодого спеціаліста на 19-й Міжнародній конференції з НК в Ялті – виступило Науково-виробниче підприємство «Машинобудування» (Дніпропетровськ), а нагородою за третє місце стала безкоштовна атестація і сертифікація за обраним дипломантом методом НК в системі сертифікації УТ НКТД. Цю можливість надали АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України і Центр сертифікації УТ НКТД.

Номінантам було запропоновано надати для розгляду в конкурсну комісію матеріали з відомос-

тями про назву, мету і задачу дипомної роботи, новизну розробки, основні науково-технічні результати і шляхи їх одержання, а для практично реалізованих розробок – фото і акти впровадження. Бажаним було також надання відгуків щодо виконаної роботи провідних спеціалістів в галузі НКТД.

Розгляд наданих матеріалів і визначення переможців відбулось 6 жовтня 2010 р. на засіданні Правління УТ НКТД.

Переможцем було визнано Грузіна Сергія Валерієвича, студента кафедри приладів і систем неруйнівного контролю НТУУ «КПІ» (завідувач кафедрою к.т.н., доцент Протасов А.Г.) за дипломну роботу «Ультразвуковий пристрій для вимірювання лінійних розмірів та швидкості звуку в об'єкті контролю». Робота виконувалась на замовлення Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. Головна мета – визначати швидкість ультразвуку в об'єкті контролю для дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу. Результатом було створення портативної системи для визначення швидкості ультразвуку на основі алгоритмів кореляційної обробки, цифрової фільтрації, статистичного аналізу, визначення зміни спектральних складових сигналу при проходженні через об'єкт контролю. Також система може працювати в режимі дефектоскопу (відображати А-скан в режимі реального часу). Живлення та дані передаються по шині USB. Це, а також малий розмір системи дозволяє використовувати її в польових умовах, встановивши програмне забезпечення на ноутбук.

Друге місце присуджене Ананьїній Марині Вадимівні, магістру кафедри приладів і методів неруйнівного контролю НТУ «ХІП» (завідувач кафедрою д.т.н, проф. Сучков Г.М.) за дипломну роботу «Розробка систем вихрострумового контролю зварних з'єднань труб». Була розроблена й обґрунтована концепція побудови моделей вихрострумових перетворювачів, робота яких не грунтується на рішенні диференціальних або інтегральних рівнянь електромагнітного поля, а заснована на рішенні завдання взаємодії елементарних струмів, що приводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, а також виготовлено макети перетворювача й установки для контролю якості зварювання і зони термічного впливу.

Володарем третього місця визначено Циха Віталія Сергійовича, студента кафедри технічної діагностики та моніторінгу ІФНТУНГ (завідувач кафедрою д.т.н., проф. Карпаш О.М.) за дипломну роботу «Методика побудови тривимірних зображень підземних комунікацій нафтогазового комплексу». В магістерській роботі запро-

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ



поновано оригінальну методику побудови тривимірних карт розміщення підземних комунікацій об'єктів нафтогазового комплексу за даними приладового дослідження їх стану. Такі карти дають можливість бачити стан усіх наземних і підземних комунікацій, а при необхідності, виділяти і детально досліджувати кожну з них шляхом пошарового перегляду тривимірного зображення з використанням функцій «приближення—віддалення». Дана методика також дозволяє вносити зміни в побудовану тривимірну карту та додавати нові об'єкти. В процесі роботи побудовано тривимірну карту реальної дослідної ділянки з наявни-



ми на ній підземними комунікаціями, яка розміщена в районі автомобільного моста через річку Бистриця-Солотвинська мікрорайону «Пасічна» міста Івано-Франківська.

Заохочувальними дипломами нагороджено Бикова Дмитра Михайловича і Смоловика Олександра Юрійовича — студентів кафедри «Прилади» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (завідувач кафедрою д.т.н., проф. Мірошніков В.В.)



Правління УТ НКТД вітає переможців конкурсу і висловлює надію на продовження плідної наукової діяльності в галузі неруйнівного контролю після закінчення університетів.

Шекеро А.Л., IE3 ім.Є.О.Патона НАН України, Мозговой О.В., Придніпровський АЦНК і ТД

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Надежность эксплуатируемых сооружений в значительной мере зависит от уровня квалификации специалистов, работающих в области неразрушающего контроля.

> Центр сертификации при Украинском обществе неразрушающего контроля и технической диагностики предлагает программу обучения специалистов в области ин-

струментального обследования зданий и сооружений, включающую комплекс методов неразрушающего контроля, а именно: визуально-измерительный, тепловой, капиллярный, ультразвуковой, магнитный, радиографический и др.

В программу включены такие вопросы, как контроль качества бетона, поиск арматуры в железобетонных изделиях, правила составления технологических карт контроля и многие другие вопросы, касающиеся технической диагностики эксплуатируемых

Преподавание ведут высококвалифицированные специалисты ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и Киевского национального университета строительства и архитектуры,

имеющие большой производственный опыт. Центр сертификации при УО НКТД оказывает помощь в разработке технологий контроля, в определении оптимального набора диагностических средств и приобретении соответствующего оборудования.

объектов.

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины Тел.: (044) 287-26-66; факс: (044) 289-21-66

В. А. Троицкому — 75



Исполнилось 75 лет доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Украины Владимиру Александровичу Троицкому.

Научную деятельность он начал в 1958 г. после окончания с отличием Московско-

го электромеханического института. В 1961 г. В. А. Троицкий впервые начал использовать магнитодиэлектрики в низкочастотной технике. Это научное направление радикально изменило технологию производства некоторых электрических машин и других электромагнитных устройств. Решению этой проблемы была посвящена кандидатская диссертация.

В 1964 г. В. А. Троицкий был приглашен на работу в ИЭС им. Е. О. Патона, где в 1973 г. защитил докторскую диссертацию. Им разработаны теоретические основы принципа амплитудного регулирования, получившего название магнитной коммутации, методики расчета различных сварочных источников питания, созданы сварочные источники с ускоренными переходами тока и напряжения через нулевое значение, резонансные источники сварочного тока, исследованы преддуговые процессы. Созданное под руководством В. А. Троицкого оборудование было освоено на 12 предприятиях СССР. С 1976 г. В. А. Троицкий руководит отделом неразрушающих методов контроля качества сварных соединений в ИЭС им. Е. О. Патона. В отделе представлены все основные физические методы (радиационные, магнитные, акустические, капиллярные, вихретоковые, тепловые и т. п.).

В. А. Троицким созданы теоретические основы намагничивания сложных магнитных цепей, возникающих при магнитных методах НК, сформулированы условия, ограничивающие возможности магнитных методов с учетом форм детали и частиц магнитного порошка. Впервые магнитная суспензия представлена как магнитодиэлектрик. Под его руководством разработана и внедрена в различных отраслях промышленности гамма магнитных дефектоскопов, три из которых выпускается серийно. Это широко известные МАГЭКСы. На протяжении почти 35 лет им ведется разработка и внедрение систем НК на разных заводах, в том числе на трубопрокатных и машиностроительных.

Под руководством В. А. Троицкого созданы уникальные методики и приборы для решения неординарных задач дефектоскопии таких, как УЗК продольных и кольцевых швов с раздельной фиксацией дефектов шва и зон термического влияния с точным слежением за осью сварных швов; УЗК ванной сварки арматуры, способы для послойного контроля толстостенных конструкций, тренажеры различных систем для подготовки операторов УЗ контроля, устройства для запоминания и анализа результатов УЗК: внедрены ультразвуковые методы TOFD, SAFT для точного определения размеров внутренних дефектов, основанные на использовании дифрагированных волн и математических методов построения искусственных апертур; УЗ методики и устройства для нахождения дефектов типа матовых пятен и оксидных пленок, не имеющих раскрытия (объема), являющихся зародышами будущих усталостных трещин в швах контактной, диффузионной сварки. Под руководством В. А. Троицкого созданы комплексы для цифровой радиографии, так называемые рабочие места рентгенолога для обработки и архивации R-информации, улучшения качества R-изображений, документирования результатов R-контроля; разработана методика диагностики тел вращения (труб реакторов и т.п.) без снятия изоляции (метод тангенциального радиационного просвечивания).

В. А. Троицкий является членом многих зарубежных обществ НКТД. Активно работает во Всемирном конгрессе (ISNDT) и в Европейской федерации (EFNDT), принимает участие в подготовке специалистов по линии МАГАТЭ, занимается гармонизацией правил аттестации персонала НК. Принимал участие в подготовке и гармонизации более 40 стандартов по НК, выполнении европейских программ LRUT и Shipinspector. В 2008 г. совместно с другими учеными мира организовал Интернациональную академию НК (IANDT), штабквартира которой находится в г. Breshia (Италия). В настоящее время проф. В. А. Троицкий работает над проблемами УЗК протяженных объектов без сканирования их поверхности и над созданием портативных систем рентгентелевизионного контроля.

Научная деятельность В. А. Троицкого отмечена премией Совета Министров СССР и Государственной премией Украины. Владимиром Александровичем подготовлено 14 кандидатов наук, написано 12 книг, в том числе шесть учебных пособий, он имеет порядка 500 патентов, авторских свидетельств, научных статей. В. А. Троицкий много лет является членом редколлегии английского журнала «Insight», зам. главного редактора журнала «Teхническая диагностика и неразрушающий контроль», членом ряда ученых советов.

Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и редколлегия журнала «Техничнская диагностика и неразрушающий контроль» сердечно поздравляют Владимира Александровича, желают ему доброго здоровья и успехов в его многогранной научной деятельности!

ПОДПИСКА — 2011 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
Стоимость	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
редакцию*	160 грн.	320 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США	52 дол. США
	*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.					

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте. Контактные телефоны: (38044) 200-82-77, 205-23-90; факс: (38044) 200-54-84, 200-82-77.

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

Адрес для доставки журнала	подписной купон	
Срок подписки с Ф. И. О.	201 г. по	201 г. включительно
Должность Тел., факс, e-mail		



РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$ Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$ Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$ Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$ Обложка внутренняя, полноцветная Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$ Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$ Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$ Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

Внутренняя вставка

система скидок

Полноцветная (разворот АЗ) (400х 290мм) — 570\$ Полноцветная (200×290мм) — 340\$ Полноцветная (200×142мм) — 170\$ Реклама в разделе информации Полноцветная (165×245мм) — 300\$ Полноцветная (165×120мм) — 170\$ Полноцветная (82×120мм) — 80\$ • Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу • Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу • Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади • При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая

Технические требования к рекламным материалам

• Размер журнала после обрези 200×290мм

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

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

• Изображения в формате TIFF, цветовая модель СМҮК, разрешение 300 dpi

• К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 1.03.2011. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+6 цв. вклейки. Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

© Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2011