

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

В.А. ТРОИЦКИЙ, М.Н. КАРМАНОВ, И.Я. ШЕВЧЕНКО

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

В последние годы наблюдается интенсивное развитие методов неразрушающего контроля (НК) применительно к оценке состояния промышленных объектов повышенной опасности. В данной статье дано описание передовых технологий НК, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. Обсуждаются возможности и особенности практического применения этих технологий в промышленности. Библиогр. 15, рис. 9.

Ключевые слова: флэш-радиография, тангенциальное рентгеновское просвечивание, подвижное локальное намагничивание, лазерная термография, контроль герметичности

Оборудование для заводов и трубопроводы в Украине эксплуатируются уже около 40 лет и основными проблемами являются усталость и коррозия металла. Эти объекты должны периодически проверяться с использованием различных методов НК с целью продления ресурса и обеспечения безопасности эксплуатации ответственных объектов, прогноза и предупреждения аварий, техногенных катастроф [1].

Этой проблеме должно уделяться исключительное внимание. Согласно отчету исследовательской компании «Frost & Sullivan», которая занимается консалтингом в области глобального развития, рынок услуг НК в США и странах западной Европы оказался одним из немногих, показавших впечатляющие результаты во время мирового финансового кризиса [2]. Несмотря на значительные убытки в промышленности в ходе мирового финансового кризиса, объемы услуг НК в 2009 г. в этих странах ни только не упали, но и выросли на 4,7 %, и в 2010 г. они составляли уже 7 %. Ожидается, что к 2017 г. они вырастут до 9%. Это свидетельствует о том, что одним из признаков развития страны являются объемы применения объективных методов и средств оценки состояния эксплуатируемых объектов.

Этим объясняются большие объемы применения физических методов исследований машин, материалов и механизмов в США и странах ЕС, где стабильный рост объема услуг НК происходит как в условиях подъема экономики, так и в период ее спада. В этих странах в случае подъема экономики резко возрастает количество новых объектов и выпускаемого оборудования, которое должно безопасно эксплуатироваться. В условиях экономического спада возрастают услуги по НК старых объектов, которые надо поддерживать с целью недопущения аварий.

Стоимость мониторинга технического состояния объектов с использованием радиационного,

электромагнитного, акустического и др. излучений несоизмеримо меньше стоимости ликвидации последствий аварий. И одной из важнейших стоящих здесь задач является совершенствование обследования долго эксплуатируемых объектов, оценка их остаточного ресурса, разработка методик НК сварных конструкций, сооружений в различных отраслях промышленности. Обеспечение безопасности эксплуатации ответственных объектов, прогноз и предупреждение аварий, техногенных катастроф – одна из главных функций специалистов, работающих в области НК.

Основная проблема — огромные объемы контролируемых конструкций сложных инженерных сооружений [3, 4]. Многие металлоконструкции находятся в труднодоступных местах, закрыты изоляцией. Невыявленные коррозионные поражения, возникающие в процессе эксплуатации технологических объектов повышенной опасности (технологические трубопроводы, суда, танки, конструктивные элементы и т.п.) могут стать причиной утечек, пожаров, техногенных катастроф. Обычно для выявления коррозионных поражений в трубопроводах под изоляцией используют традиционные локальные методы диагностики, связанные со снятием изоляции, возможным возведением лесов, что резко повышает трудоемкость и стоимость такого контроля. Ключевые позиции здесь занимает периодический НК наиболее нагруженных элементов сооружений с использованием воздействия на них различных физических полей (электромагнитных, акустических, радиационных и др.). Выборочный контроль в этом случае не гарантирует полного выявления поврежденных участков контролируемых объектов.

Современные средства НК позволяют решить данную проблему с использованием так называемых интегральных методов контроля:

– низкочастотный ультразвуковой контроль направленными волнами [5] позволяет прово-



дить 100%-ный контроль состояния внутренней и внешней поверхности трубопроводов на больших расстояниях (20...100 м) без сканирования их поверхности, без снятия термоизоляции, в том числе в недоступных местах – под землей, под водой, под авто- и железнодорожными переходами;

– термографический контроль [6] обеспечивает 100%-ный контроль на больших визуально доступных поверхностях контролируемого объекта.

Интегральные методы отличаются высокой производительностью и используются для сплошного контроля объектов с последующим контролем выявленных потенциально опасных участков традиционными локальными методами НК с точным измерением выявленных дефектов и соответствующей оценкой качества контролируемого объекта.

Обеспечение безопасности эксплуатации ответственных объектов, прогноз и предупреждение аварий, техногенных катастроф – одна из главных задач специалистов, работающих в области охраны труда. Ключевые позиции занимает периодический НК наиболее нагруженных элементов сооружений с использованием воздействия на них различных физических полей (электромагнитных, акустических, радиационных и др.).

Одной из важнейших задач является совершенствование обследования долго эксплуатируемых объектов, оценка их остаточного ресурса, разработка методик НК сварных конструкций, сооружений в различных отраслях промышленности. В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разрабатываются соответствующее оборудование и оригинальные технологии на основе радиационных, акустических, магнитных и других физических полей, которое позволяет измерить размеры и расположение внутренних дефектов. Эта информация ложится в основу последующих расчетов прочности, определения остаточного ресурса и допустимости эксплуатации объекта.

Имеющийся в ИЭС им. Е.О. Патона научно-технический потенциал позволяет обеспечивать высокий уровень разрабатываемых технических регламентов, часть этих технологий была разработана при выполнении проектов 6-й и 7-й Рамочных программ ЕС.

Ниже приведены краткие описания некоторых современных технологий оценки качества эксплуатируемых объектов, соответствующих мировым стандартам, которые должны быть внедрены в Украине.

Флэш-радиография – это радиография без использования рентгеновских пленок и связанных с ними расходных материалов [7]. Технология радиационного контроля без промежуточных носителей информации (пленок, запоминающих пластин), обеспечивает получение рентгеновско-

го изображения внутренней структуры объекта в электронном виде в реальном времени, т. е. непосредственно во время просвечивания объекта. Это портативное рентгентелевидение. Процесс получил название флэш-радиографии. Для этих целей используются два вида преобразователей: твердотельные и электронно-оптические. Они могут быть разных размеров и рассчитаны на разные энергии излучения.

В отличие от пленочной радиографии результат получают на экране монитора в виде распечатки изображения на обычной писчей бумаге и на электронном носителе информации.

Портативная рентгентелевизионная технология (рис. 1) полностью заменяет пленочную радиографию. При необходимости рентгентелевизионная информация в электронном виде передается по Интернету или сохраняется. Объем записи на портативное запоминающее устройство (флэш-ку) практически не ограничен. В флэш-радиографических системах применяются высокочувствительные цифровые камеры, эффективные рентгеновские экраны. Такие мобильные рентгентелевизионные системы (массой до 15 кг) имеют размер рабочего поля 120...200 мм, обеспечивают чувствительность контроля 0,8...1 %, что лучше или соизмеримо с чувствительностью рентгеновских пленок и имеют разрешающую способность до 5 пар лин./мм. По скорости, стоимости, производительности новая технология на порядок эффективнее, чем пленочная радиография. Портативные флэш-рентгентелевизионные системы обеспечены программами для обработки и архи-

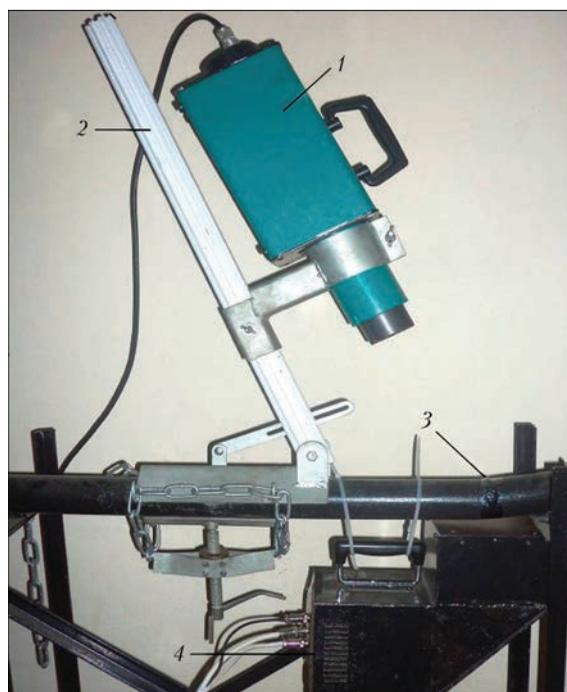


Рис. 1. Портативная цифровая рентгентелевизионная система (РТС-П): 1 – рентгеновский излучатель; 2 – штатив; 3 – контролируемое сварное соединение, 4 – детектирующее устройство



Рис. 2. Цифровая система радиографического контроля вирования изображений, а также измерения размеров дефектов. Для реализации этой технологии используются технические средства, имеющиеся у Заказчика, т.е. переход от традиционной пленочной радиографии к новой технологии не вызывает особых проблем и состоит только в замене пленки на электронный детектор, монитор и печатающее устройство. Ожидается широкое внедрение флэш-радиографии для контроля качества газо- и нефтепроводов; элементов и конструкций авиационного, железнодорожного и автомобильного транспорта; продукции химического и энергетического машиностроения; сварных и паяных соединений; сосудов высокого давления; композитных материалов и в таможенном деле. Флэш-радиография проводится оперативно в реальном времени при скорости и стоимости получения изображения на порядок быстрее, чем при пленочной радиографии.

Цифровая обработка радиационных изображений используется как при флэш-радиографии, так и для повышения качества и разрешающей способности традиционных рентгеновских снимков на пленку. При этом предлагается концепция модульного построения цифровых систем радиационного контроля, обеспечивающая возможность выбора заказчиком цифровых ресурсов, необходимых для расшифровки изображений радиационного контроля в каждом конкретном случае. В предлагаемой

модульной системе (рис. 2) могут использоваться различные типы радиационных детекторов (рентгеновская пленка, рентгентелевизионные камеры, матричные преобразователи и др.) [8].

Использование данного комплекса увеличивает качество радиационных изображений, позволяет увеличить чувствительность радиографии.

Тангенциальное рентгеновское просвещение, т.е. просвещение по касательной [9]. Это новая технология, применяется тогда, когда радиографический контроль в стандартных проекциях невозможно выполнить или он не обеспечивает получения необходимых данных. При этом тангенциальные проекции проводят с направлением центрального луча по касательной к изучаемому объекту (рис. 3).

Тангенциальное просвещение позволяет определять остаточную толщину металла труб (коррозии/эрозии на внешней или внутренней поверхности стальных труб), зазоры между обшивкой и телом, внутреннее заполнение объема и т.п. без снятия внешней изоляции. Пока эта уникальная технология внедрена при НК тонкостенных труб из аустенитных сталей атомных электростанций Украины. Для наглядности метода разработана цветовая селекция границ радиационного изображения стенок трубы и последующих наслоений, например, теплоизоляции, защитного кожуха и т.п. Точность определения толщины стенки для труб диаметром до 100 мм составляет $\pm 0,2$ мм. Эта технология успешно применяется для оценки коррозии.

Технология подвижного локального намагничивания дала толчок более широкому применению магнитопорошковой дефектоскопии, обеспечила переход от традиционных способов однонаправленного намагничивания к разнонаправленному, т.е. к активному поиску дефектов.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ впервые разработаны портативные средства для локально-

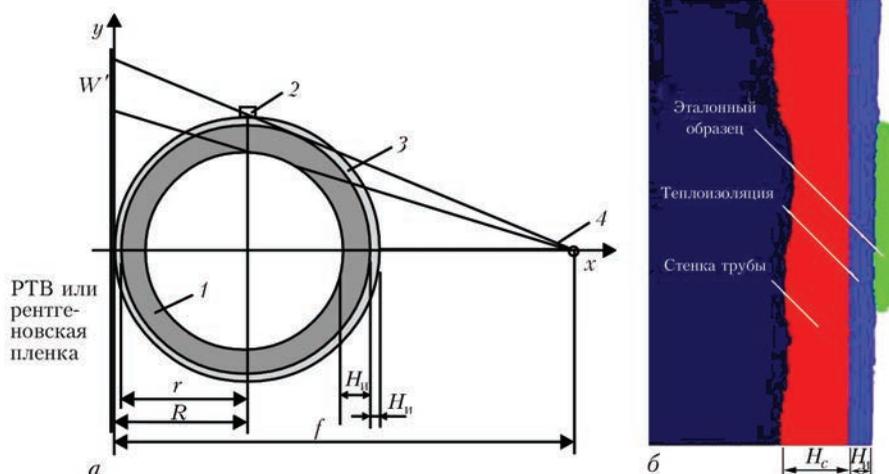


Рис. 3. Тангенциальное просвещение трубы: а – схема просвещения; б – цветовая селекция результатов контроля толщины стенки трубы (1 – труба; 2 – эталонный образец; 3 – изоляция трубы; 4 – источник излучения)



Рис. 4. Подвижные намагничивающие устройства

го разнонаправленного намагничивания, что позволяет находить трещины и зоны повышенного (усталостного) нагружения [10]. Выпущена серия таких намагничивающих устройств (НУ) под разные геометрические формы контролируемых объектов с широкими функциональными возможностями (рис. 4). Возвратно-поступательные движения этих устройств способствуют повышению выявляемости трещин. После обнаружения скоплений магнитного порошка НУ переводится в режим оценки индикации, в режим увеличения тангенциальной составляющей магнитного поля.

Магнитопорошковый контроль (МПК) объектов со сложной геометрией поверхности проводится с использованием сменных полюсных наконечников. Особенно эффективен этот контроль крупногабаритных изделий (например, тележек, ободов колес, элементов железнодорожного транспорта), контроль качества протяженных объектов больших площадей (днища резервуаров, листовые кон-

струкции), патрубков нефте-, газопроводов и др. Эту отечественную технологию высоко оценили японские и американские специалисты [11, 12].

Имеется большой практический опыт внедрения подвижных НУ и новой технологии МПК для объектов железнодорожного транспорта. Эти устройства изготавливаются под конкретные конструкции, подлежащие МПК (см. рис. 4).

Лазерная термография – это перспективная современная технология. Несмотря на то, что в настоящее время появилось много технических возможностей для термографических исследований, пока нет технологий для дистанционных измерений размеров обнаруженных площадей, зон потери тепла, глубины поражения. Для решения этой задачи нами предложено объединить термографию с лазерными дальномерами [6]. Созданные в ИЭС им. Е.О. Патона лазерно-термографические измерительные системы позволяют определять дистанционно координаты и геоме-

трические размеры потенциально опасных дефектов. В результате исследований было разработано измерительное лазерно-термографическое устройство и соответствующее ему программное обеспечение для определения координат и геометрических размеров дефектов, обнаруженных при термографии.

Данный комплекс прост в эксплуатации, может использоваться в атомной, химической и нефтехимической, нефтегазодобывающей промышленности, для объектов газотранспортной системы, электрических систем и машин, жилых зданий, домен, промышленных и гражданских сооружений (рис. 5).

Контроль низкочастотными ультразвуковыми (УЗ) волнами протяженных объектов является одним из важнейших достижений УЗ контроля, позволяющего контролировать длинномерные конструкции без сканирования их поверхности [5]. В основу этого метода положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн, способных распространяться на большие расстояния. Это позволяет обнаруживать коррозионные поражения, глубина которых не менее 10 % толщины стенки трубы на расстоянии до 100 м. При этом доступ к трубе необходим только в месте установки акустической антенны, состоящей

из набора низкочастотных УЗ преобразователей. Обследование может выполняться в процессе эксплуатации труб, заполненных газом, а также при повышенных температурах без снятия изоляции.

На рис. 6 показаны антенны на труднодоступных (подземных) технологических трубопроводах с температурой поверхности до 80 °С, диаметром до 330 мм.

Созданная в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины аппаратура работает на частотах 16 и 36 кГц для контролируемых труб от 54 до 330 мм.

Технология оценки размеров трещиноподобных несплошностей, осуществляемая дифракционно-временным ультразвуковым методом известна за рубежом как метод TOFD [13]. Технология заключается в анализе УЗ волн дифракции, которые возникают на границах несплошности, т.е. на краях трещин. Погрешность измерения размеров трещин составляет 1...2 мм в диапазоне металла толщин 10...50 мм. Традиционные амплитудные методы УЗК оценки размеров внутренних несплошностей в сварных соединениях имеют значительно более высокие погрешности. Периодическое использование оборудования для точного измерения трещиноподобных дефектов позволяет наблюдать за развитием дефекта без прекращения

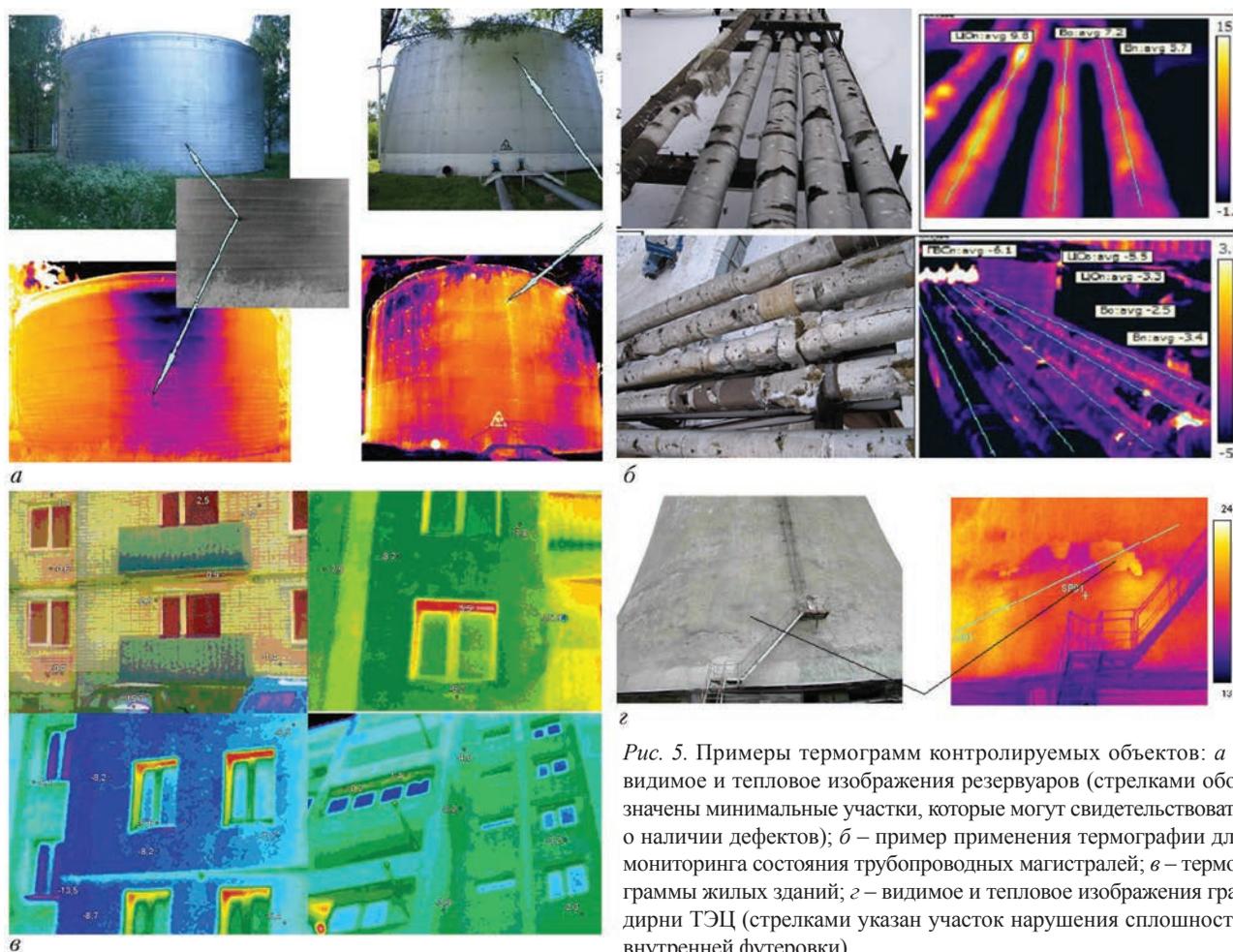


Рис. 5. Примеры термограмм контролируемых объектов: а – видимое и тепловое изображения резервуаров (стрелками обозначены минимальные участки, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов); б – пример применения термографии для мониторинга состояния трубопроводных магистралей; в – термограммы жилых зданий; г – видимое и тепловое изображения градирни ТЭЦ (стрелками указан участок нарушения сплошности внутренней футеровки)

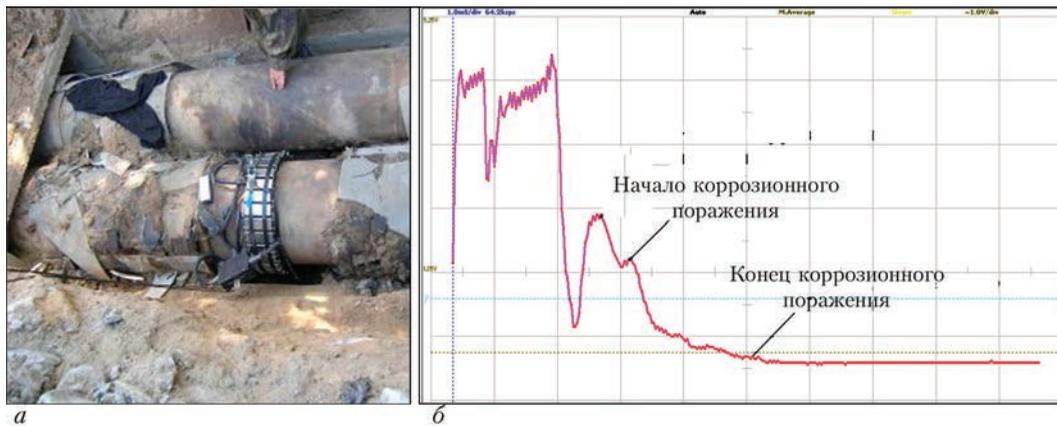


Рис. 6. Контроль подземного участка действующей теплотрассы (а) и осциллограмма эхо-сигнала от коррозионного поражения трубопровода (б)

эксплуатации ответственного объекта, что выполняется сейчас на оборудовании АЭС.

Такой мониторинг состояния сварных металлоконструкций, определение точных размеров трещиноподобных несплошностей в сварных соединениях и основном металле при диагностических инспекциях ответственных и тяжелонагруженных конструкций должен быть введен на всех ответственных объектах. Эта технология используется во всех странах ЕС для обследования технологического оборудования, различных металлоконструкций. Технология TOFD многократно использовалась на различных предприятиях Украины, в частности, на нефтеперерабатывающих заводах, магистральных трубопроводах, АЭС и др. Ее должны освоить все экспертно-технические центры.

Изучение зоны термического влияния. Зона термического влияния (ЗТВ) сварных соединений часто более опасна, чем сварные швы. Разработана технология для отдельной регистрации дефектов шва и дефектов металла ЗТВ при автоматизированном ультразвуковом контроле (АУЗК), создан соответствующий акустический блок (рис. 7) [14]. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) этого блока посылают в металл зондирующие импульсы и принимают эхо-сигналы от дефектов каждый в своей зоне. Для идентификации эхо-сигналов от дефектов в шве и от дефектов околошовной зоны используются амплитудный и временной признаки принятых эхо-сигналов.

Технология с отдельной регистрацией дефектов в сварном шве и металле ЗТВ сварного шва важна при эксплуатации магистральных трубопроводов, которые обычно разрушаются по околошовной зоне. Возможно применение этой технологии в других отраслях промышленности при производстве сварных конструкций.

Хорошие результаты показала промышленная проверка установок АУЗК НК205, НК106 на Харьковском трубном заводе.

Ультразвуковые компьютеризированные методы контроля ответственных объектов основаны на технологии фазированных антенных решеток, которыми сейчас занимаются во всем мире.

Преобразователь фазированной решетки представляет множество миниатюрных пьезоэлектрических элементов, объединенных в одном датчике. Управление каждым элементом решетки выполняется программно от компьютера или специального микропроцессора, обеспечивающего возможность изменения угла излучения фазированного датчика.

Этот метод позволяет получить наглядное изображение дефектов контролируемого объекта, что значительно облегчает понимание полученных результатов, повышая их точность.

Ультразвуковая толщинометрия – одна из самых распространенных технологий. Толщинометрия широко используется для оценки фактического значения толщины стенок элементов металлических конструкций в местах, недоступных для измерения толщины механическим измерительным инструментом. Ультразвуковая толщинометрия позволяет оценить степень расслоения и потери металла в процессе его эксплуатации. Этот метод обеспечивает высокую точность определения толщины только в том случае, если он выпол-

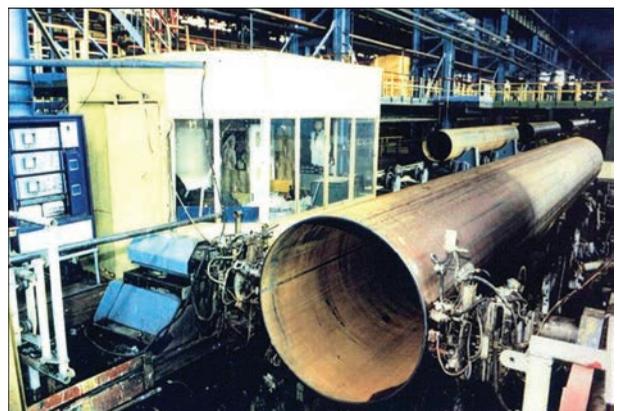


Рис. 7. Система АУЗК с отдельной фиксацией дефектов шва и металла ЗТВ околошовной зоны

няется правильно. Профессиональное обучение технологии толщинометрии является залогом правильной диагностики.

Контроль герметичности сварных соединений различных изделий и сооружений зависит от особенностей объектов (сосуды давления, баллоны, трубопроводы, резервуары, топливные баки, силовые гидросистемы, листовые сварные конструкции с односторонним доступом и прочее). Для прецизионных исследований применяется оборудование для масс-спектрометрического, галогенного, химического контроля. Для более простых задач используется контроль жидкостным, пузырьковым и другими методами. По указанным видам контроля герметичности, отличающимся производительностью и чувствительностью, готовятся и аттестуются специалисты по Международному стандарту ISO 9712, разрабатываются технологические регламенты, которые согласовываются в разрешительных структурах.

Технологические структуры капиллярного контроля (КК) сварных соединений и литых изделий различных узлов машин, механизмов и

промышленных объектов осуществляется цвето-контрастным или люминесцентным методами с использованием дефектоскопических материалов ведущих мировых производителей. Для выполнения КК создан передвижной стенд (рис. 8), оборудованный вытяжкой и другими средствами для эффективного контроля [15].

Стенд изготавливается по индивидуальным заказам экспертно-технических организаций. Капиллярный метод НК является одним из самых распространенных, применяется для обследования ответственных объектов, преимущественно из цветных металлов, нержавеющей стали, но в отличие от других методов эта технология несет и большое количество перебраковок, дает много ложных, ошибочных индикаций. Поэтому для капиллярного метода важно иметь хороший практический опыт и соответствующее недорогое оборудование (см. рис. 8). Подвижной стенд для НК оборудован вытяжкой, ультразвуковой камерой очистки поверхности и другими полезными технологическими приспособлениями.

Обследования резервуаров различного назначения трубопроводов для хранения нефтепродуктов, жидкого аммиака, спиртов и других жидкостей (рис. 9) требует применения разных методов НК.

Так, технический регламент по обследованию резервуаров для хранения нефтепродуктов, жидкого аммиака, спиртов, нефтепродуктов включает визуальный контроль, измерение толщины листов стенки, днища и кровли, контроль герметичности днища, измерение отклонений стенки от вертикали, измерение проседания днища, а также оценку коррозионных повреждений, расчет внутренних механических напряжений. Поэтому подготовка и выдача заключений в соответствии с требованиями «Правил технической эксплуатации резервуаров» является ответственной и длительной процедурой, за которой обычно следуют ремонтные работы.

ИЭС предлагает не только современные технологии в области НК и ТД, но и ведет разработку соответствующей нормативно-технической документации на конкретные технологические процессы с учетом требований международных и европейских стандартов.



Рис. 8. Подвижной стенд для капиллярного контроля, рекомендуемый для всех экспертно-технических центров



Рис. 9. Контроль резервуаров



Выводы

Взятый Украиной курс на евроинтеграцию требует более тщательной организации НК и технической диагностики в стране. Представленные современные методы НК обеспечивают возможность полномасштабного обследования объектов повышенной опасности, минимизируя затраты на выполнение таких работ.

1. Патон Б.Е., Троицкий В.А. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по совершенствованию неразрушающего контроля сварных соединений // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – № 4. – С. 13–29.
2. Карманов М.Н. Рынок услуг неразрушающего контроля продолжает расти // Информ. бюл. УТ НКТД «НК-Информ». – 2014. – № 4. С. 2–3.
3. Троицкий В.А. Основные тенденции развития неразрушающего контроля металлоконструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2012. – № 3. – С. 67–70.
4. Троицкий В.А. Мониторинг больших площадей корабельных и мостовых конструкций в свете проекта ShipInspector // Территория NDT. – 2013. – № 1. – С. 50–54.
5. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Горбик В.М. Опыт применения низкочастотного ультразвукового контроля для мониторинга состояния технологических трубопроводов // Территория NDT. – 2015. – № 1. – С. 44–48.
6. Троицкий В.А., Глуховский В.Ю. Повышение эффективности тепловизионной диагностики потенциально опасных и удаленных объектов // Там же. – 2014. – № 3. – С. 36–38.
7. Троицкий В.А. Флэш-радиография // Там же. – 2013. – № 4. – С. 44–49.

8. Карманов М.Н., Шалаев В.А. Модульные системы цифрового радиационного контроля. Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее // Межд. конф. – 25–28 нояб. 2013 г. Тез. докл.: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – Киев, 2013. – С. 147–148.
9. В.А. Троицкий, М.Н. Карманов, Н.Г. Белый, В.Н. Бухенский. Повышение точности измерений при тангенциальном радиационном просвечивании // Матер. 19-й Межд. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Гурзуф. 3–7 окт. 2011 г. – С. 36–39.
10. Троицкий В.А. Подвижное локальное намагничивание металлоконструкции при магнитопорошковом контроле // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 1. – С. 16–22.
11. Troitskiy V. Devices for the Movable Local Multidirectional Magnetization of Metal Structures in Magnetic Particle Testing // Materials Evaluation. – 2015. – 73, № 6. – P. 675–683.
12. Troitskiy V. Multidirectional Local Magnetization of Extended Metal Structures in Magnetic Particle Testing // Ж. Японского общества JSND Journal. – 2015. – 64, № 2.
13. Давыдов Е., Шекеро А., Миховски М. Алексиев А. Пространственно-временной анализ дифрагированных сигналов с целью увеличения точности измерения размеров дефектов методом TOFD/Сб. науч. докл. «Акустика». – 2009. – Вып. 11. – С. 76–87
14. Трубная промышленность. Повышение качества производимой продукции за счет внедрения новейших средств автоматизированного неразрушающего контроля / А.В. Юрченко, А.П. Тимошенко, И.Я. Шевченко и др. // Территория NDT. – 2012. – № 3. – С. 62–67.
15. Посыпайко Ю.Н. Разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области контроля герметичности сварных соединений // Сб. тез. Междунар. конф. «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее», 25–26 нояб. 2013 г.: Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2013. – С. 150.

Intensive development of NDT techniques for evaluation of the condition of higher hazard industrial facilities has been observed in recent years. This paper gives a description of advanced NDT technologies developed by PWI of NASU. Possibilities and features of practical application of these technologies in industry are discussed. 15 References, 9 Figures.

Keywords: flash-radiography, tangential X-ray screening, mobile local magnetization, laser tomography, tightness control

Поступила в редакцию
25.11.2015