

РАЗРАБОТКИ ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины является одним из ведущих научно-исследовательских центров в области создания неразъемных соединений и материаловедения. Создание новых конструкций, освоение новых материалов, технологий сварки, наплавки, пайки и др. технологий сопровождается разработкой технологий неразрушающего контроля (НК). Информация НК ложится в основу прочностных расчетов, определения остаточного ресурса и допустимости продолжения эксплуатации объекта (рис. 1). В ИЭС им. Е.О. Патона накоплен богатый многолетний опыт по использованию методов и средств НК качества материалов и сооружений практически для всех отраслей промышленности с применением всех основных методов НК (визуальный, радиационный, магнитопорошковый, капиллярный, ультразвуковой, термография и т. д.).

При участии ИЭС им. Е.О. Патона:

- подготовлены основные Постановления правительства и Президиума НАНУ, которые определили развитие научной и производственной базы НК в Украине;
- созданы в четырех вузах специализированные кафедры по НК;
- введена в Украине трехуровневая международная система аттестации специалистов НК;
- организована Международная академия наук по НК (Academia NDT International) со штаб-квартирой в г. Брешия (Италия);
- предложен переход от покิโลметровой к потрубной системе технического обслуживания магистральных трубопроводов с кодами, считываемыми устройствами для внутритрубного и наружного контроля.

Ниже приводятся примеры некоторых разработок ИЭС в области НК.

Созданы приборы для **оптоэлектронного визуально-измерительного контроля (ВИК)**. Наибо-

лее простым и самым распространенным методом НК является визуальный контроль, предшествующий всем остальным видам НК. По внешнему виду сварного шва можно дать общее представление о его качестве. Достоверность визуального НК во многом определяется человеческим фактором (утомляемость, внимательность и т. п.). В настоящее время для того, чтобы перепроверить или уточнить полученные результаты необходимо заново проводить визуальный контроль подозрительных участков сварного шва.

Для устранения этих недостатков созданы приборы цифрового визуального контроля, позволяющего считывать изображения сварного шва, измерять его геометрические параметры, осуществлять беспроводную передачу полученных изображений и запоминать их в цифровом виде. Полученные записи изображений сварных швов в дальнейшем обрабатываются, документируются и архивируются программой обработки изображений, определяется их класс в соответствии с ДСТУ ISO 5817.

Пример реализации оптоэлектронного визуального контроля на базе подвижного намагничивающего устройства типа ТВА показан на рис. 2. Прибор ВИК/ТВА-1 предназначен для объективной записи со скоростью до 3 м/мин. Здесь имеется подсветка 1, 2 околошовной зоны и два лазерных указателя ширины шва. Считывание изображения выполняется с помощью миниатюрной USB видеокамеры 3. В качестве монитора и регистратора используется смартфон 4. В полый ручке 5 прибора находятся аккумуляторы, обеспечивающие восемь часов непрерывной записи и трансляции информации по Wi-Fi. Прибор комплектуется кабелем 6, что позволяет наблюдать и записывать ВИК-информацию в недоступных для наблюдателя зонах на расстоянии до 5 м.



Рис. 1. НК металлоконструкции НСК «Олимпийский» выполнялся с участием ИЭС им. Е.О. Патона

Прибор предназначен для записи и последующего анализа результатов ВИК со скоростью порядка 3 м/мин. Преимуществом предлагаемого автоматизированного ВИК является простота его использования, достоверность полученной информации о всех внешних недостатках сварного шва. Снижается влияние человеческого фактора на результаты НК, возможность объективного сравнения качества швов с требованиями стандартов ISO-5817, ISO-6520.

Для ответственных объектов уже сегодня имеются все предпосылки для внедрения автоматизированного точного ВИК, который может комплектоваться различными оптическими измерительными устройствами, подтверждающими классность сварных швов, которая может быть В, С, D (ISO-5817) в зависимости от назначения и требований Заказчика.

Флэш-радиография использует твердотельные, электронно-оптические, сцинтилляционные рентгеновские преобразователи, обеспечивающие «мгновенное» считывание (флэш) рентгеновских изображений с последующей их цифровой обработкой. В отличие от пленочной радиографии результаты НК мгновенно получают на экране монитора, которые сохраняются на электронном носителе информации.

Разработанные мобильные рентгентелевизионные системы имеют размер рабочего поля



Рис. 2. Автоматизированная система ВИК на базе подвижного намагничивающего устройства типа ВИК/ТВА-1 (описание 1–6 см. в тексте)

120...200 мм, обеспечивают чувствительность контроля 0,8...1,0 % и разрешающую способность до 5 пар лин./мм (рис. 3).

X-ray mini технологии. Для радиационного контроля тонкостенных металлоконструкций и изделий часто используются миниатюрные недорогие твердотельные R-преобразователи типа S10811-11 японской фирмы Hamamatsu Photonics, с зоной контроля 24×34 мм и разрешающей способностью 25 мкм (рис. 4). При этом суммарная радиационная толщина контролируемых изделий, определяемая допустимым значением напряжения на рентгеновской трубке для данного типа рентгеновского преобразователя составляет 70 кВ. На этих энергиях изделия из алюминиевых сплавов просвечиваются толщиной до 4...5 мм, для стали – 2 мм. Подобные твердотельные миниатюрные R-преобразователи имеются других размеров и для других энергий. Подобные флюороскопические R-преобразователи, изготавливаемые ИЭС, содержат недорогие видеокамеры, применяемые в астрономии.

Сверхвысокая разрешающая способность твердотельных R-преобразователей позволяет выполнять 10...20-кратное цифровое увеличение полученного рентгеновского изображения на экране монитора без снижения его качества. Минимальный размер выявляемых дефектов 25...50 мкм.

Повысить разрешающую способность позволяет цифровая микрофокусная рентгеноскопия, в основе которой лежит применение источников рентгеновского излучения, фокусное пятно которых менее 0,1 мм. Микрофокусные аппараты позволяют выявлять в контролируемых объектах включения с очень тонкой структурой (например, проводники толщиной 15...25 мкм, детали детонаторов и др.). Основное преимущество микрофокусных излучателей – возможность получения изображений отдельных областей контролируемого объекта с большим геометрическим увеличением (2...10 раз)



Рис. 3. Рентгентелевизионный НК с помощью твердотельного миниатюрного R-преобразователя четырехниточного трубопровода на Киевском кислородном заводе (а) и рентгенограмма сварного соединения фрагмента трубы, просвеченной через две стенки (б)

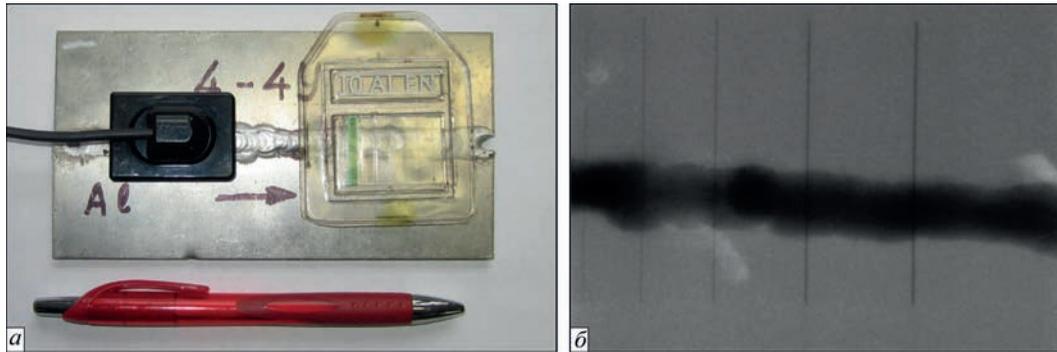


Рис. 4. Тангенциальный R-преобразователь (а) или ПЗС-матрица размерами 24×34 мм; б – результаты с экрана монитора без ухудшения качества изображения. Таким образом подозрительный дефектный участок, выявленный при контактном просвечивании, может быть детально обследован при повторном уже бесконтактном удаленном просвечивании с повышенной до 10-кратной разрешающей способностью.

Х-гау mini технологии в сочетании с микрофокусными излучателями успешно применяются в НК электронных плат, чипов, электронных элементов и других мелких предметов.

Для контроля протяженных объектов в ИЭС им. Е.О. Патона на основе мини-детектора S10811-11 был разработан недорогой прецизионный рентгентелевизионный сканер для изучения протяженных объектов. Для формирования увеличенной контролируемой рабочей зоны выполняется цифровое (программное) сшивание малоформатных изображений, небольшие участки рентгенограмм сшиваются в процессе электромеханического сканирования в единую рентгенограмму объекта.

В качестве электропривода рентгентелевизионного сканера (своеобразного робота) используют шаговый двигатель, линейные направляющие и прецизионные валы. Для программного управления приводом используются микроконтроллеры Arduino. Макет такого робота показан на рис. 5.

Результаты программного сшивания отдельных фрагментов рентгеновского изображения при сканировании контролируемого объекта приведены на рис. 6.

Предлагаемая технология контроля с использованием сканера по крайней мере на порядок де-

шевле известных в настоящее время технологий на основе крупноформатных цифровых панелей. Стоимость миниатюрного R-преобразователя, примененного для получения снимка по рис. 6, не превышает нескольких тыс. дол. США. Крупноформатный преобразователь таких размеров имеет стоимость до 50...100 тыс. дол. США. Разработанный по программе «Ресурс» сканер должен найти применение для R-контроля лопастей вертолетов, элементов оперения самолетов и других протяженных объектов.

Тангенциальное рентгеновское просвечивание, т. е. просвечивание по касательной к образующей тела вращения (рис. 7), позволяет определять остаточную толщину металла труб, (глубину коррозии/эрозии на внешней или внутренней поверхности стальных труб), зазоры между обшивкой и телом, без снятия внешней изоляции. В последнее время 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 уникальная технология внедрена при НК толстостенных труб из аустенитных сталей атомных электростанций Украины. Работа выполнена и сдана НАЭК Украины. Методика и оборудование для тангенциального просвечивания должны использоваться в тех случаях, когда УЗ-толщинометрия невозможна из-за большого затухания УЗ-колебаний.

Лазерная термография. В настоящее время термография широко используется для дистанционного обследования ответственных промышленных и гражданских объектов. При этом важно уметь дистанционно измерять размеры обнаруженных зон потери тепла и глубины поражения. В ИЭС созданы лазерно-термографические измерительные системы, которые позволяют определять дистанционно координаты и геометрические размеры зон повышенной потери тепла промышленных и гражданских объектов.

Комплекс прост в эксплуатации, может использоваться в атомной, химической и нефтехимической, нефтегазодобывающей промышленности для



Рис. 5. Действующий макет рентгентелевизионного сканера



Рис. 6. Цифровая рентгенограмма сварного шва протяженностью 200 мм (35×200 мм), полученная с помощью шести экспозиций

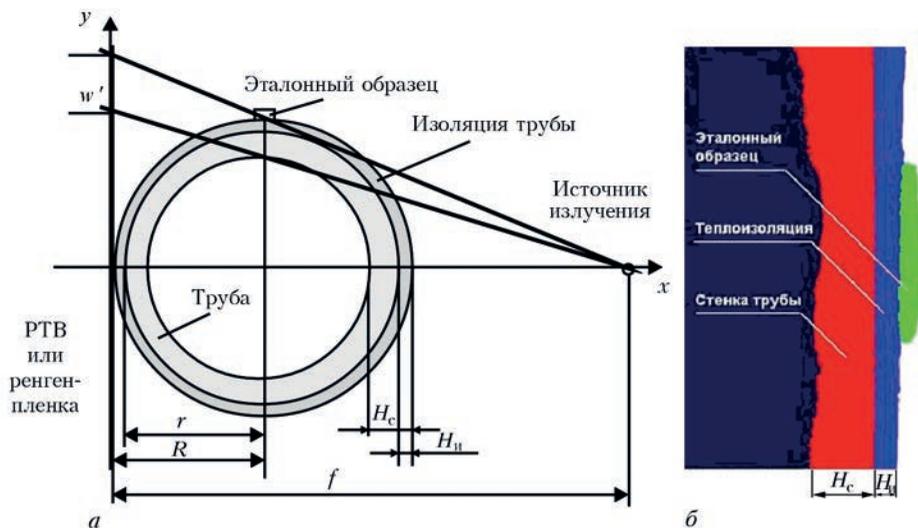


Рис. 7. Тангенциальное просвечивание трубы *a* – схема просвечивания; *б* – цветовая селекция результатов контроля толщины стенки трубы

объектов газотранспортной системы, электрических систем и машин, жилых зданий, домен, промышленных и гражданских сооружений (рис. 8).

Низкочастотный ультразвуковой контроль (НЧ УЗК) – один из проектов, выполненных ІЭС по программе «Ресурс», позволяет контролировать технологические трубопроводы и другие длинномерные конструкции без сканирования их поверхности. В его основу положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн,

способных распространяться на большие расстояния по телу закрытых объектов (теплотрассы, дтрубы для подачи топлива под взлетной полосой и т. п.). НЧ УЗК позволяет обнаруживать коррозионные поражения стенок трубы на расстоянии до 100 м. При этом доступ к трубе необходим только в месте установки акустической антенны. Обследование может выполняться в процессе эксплуатации труб при повышенных температурах без снятия изоляции.

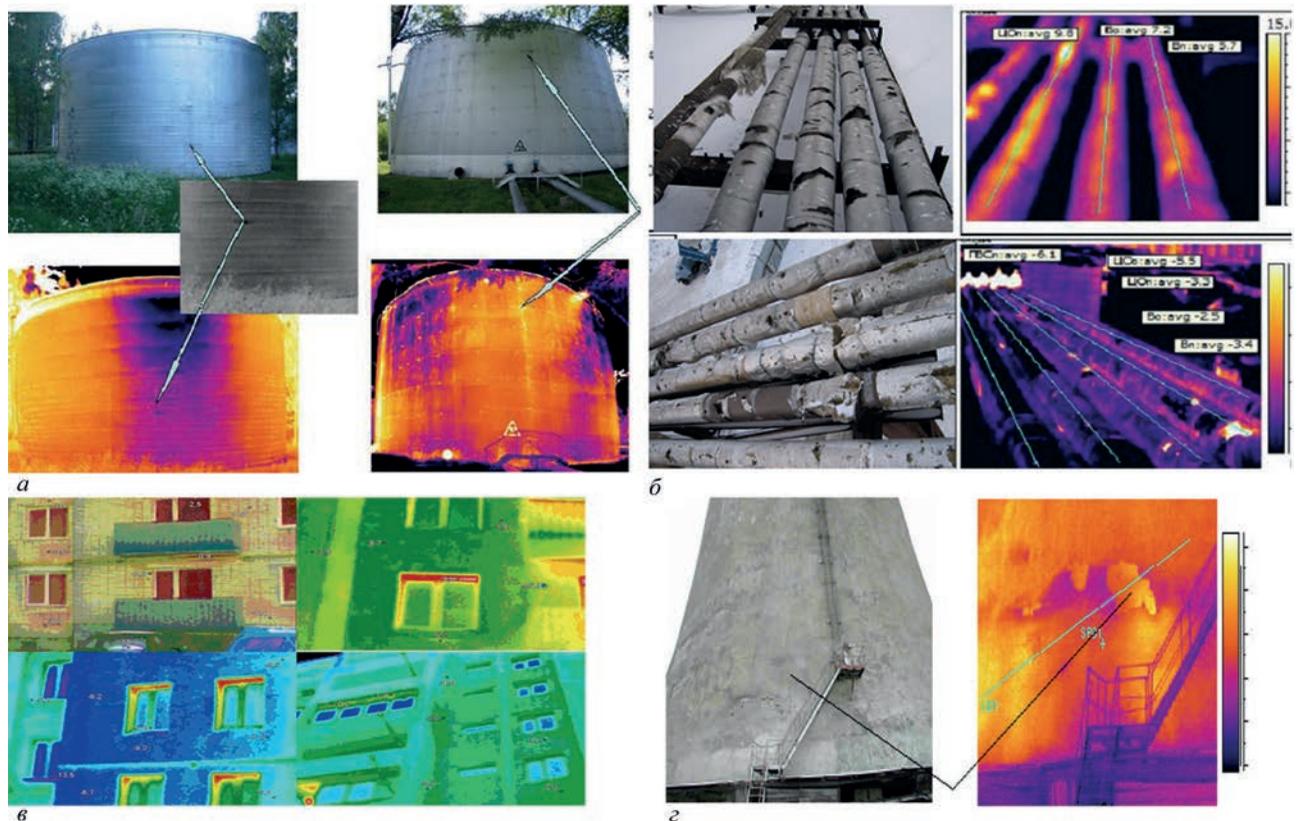


Рис. 8. Примеры термограмм контролируемых объектов: *a* – видимое и тепловое изображения резервуаров (стрелками обозначены минимальные участки, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов); *б* – применение термографии для мониторинга состояния трубопроводных магистралей; *в* – термограммы жилых зданий, отдельные квартиры имеют повышенный расход тепла; *г* – видимое и тепловое изображения градирни ТЭЦ (стрелками указан участок нарушения сплошности внутренней футеровки)

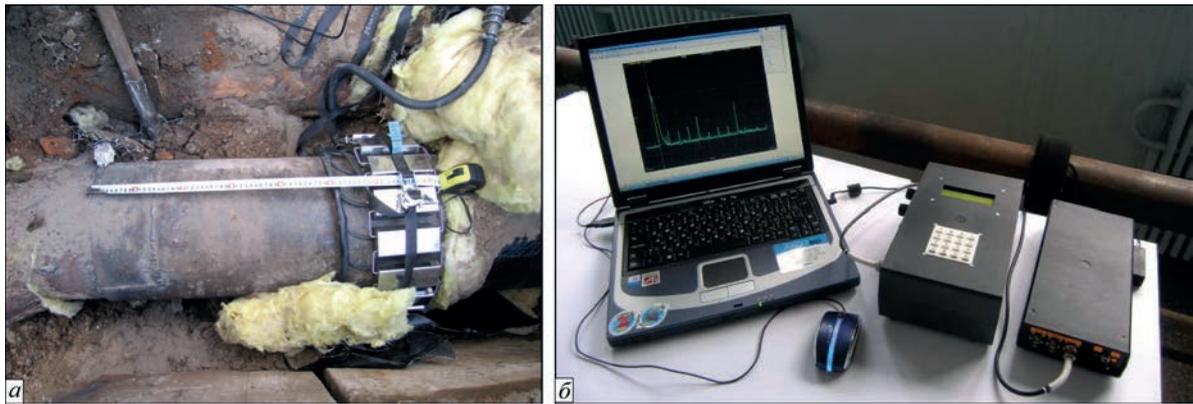


Рис. 9. Антенны дефектоскопов НЧ УЗК «Универсал-2П» 16 кГц (а) и «Универсал-1П» 36 кГц (б) на технологических трубопроводах диаметром 330 (а) и 154 мм (б)

Разработанные в ИЭС НЧ-дефектоскопы работают на частотах 16 и 36 кГц, предназначены для технологических трубопроводов диаметром от 54 до 330 мм (рис. 9). Они успешно применяются для НК теплотрасс и других протяженных объектов.

Технология оценки размеров трещиноподобных несплошностей, осуществляемая диф-

ракционно-временным ультразвуковым методом, разработанным и воплощенным в приборе ZIP-scan (Великобритания), распространенным под названием «Time of Flat Diffraction» (TOFD). Эта технология точного измерения внутренних трещин была освоена с институтами TWI (Великобритания) и Force (Дания). В ИЭС применяются ZIP-scan (Великобритания) и P-scan (Дания). Погрешность измерения размеров трещин составляет 1...2 мм в диапазоне толщин металла по методике TOFD составляет 10...50 мм. Традиционные амплитудные методы УЗК имеют значительно более высокие погрешности измерений. Периодическое использование оборудования для точного измерения трещиноподобных дефектов позволяет наблюдать за развитием внутренних трещин без прекращения эксплуатации ответственного объ-



Рис. 10. Пример измерения в сварном соединении трещины методом TOFD



Рис. 11. Примеры применения подвижных намагничивающих устройств типа ТВА на железнодорожных металлоконструкциях

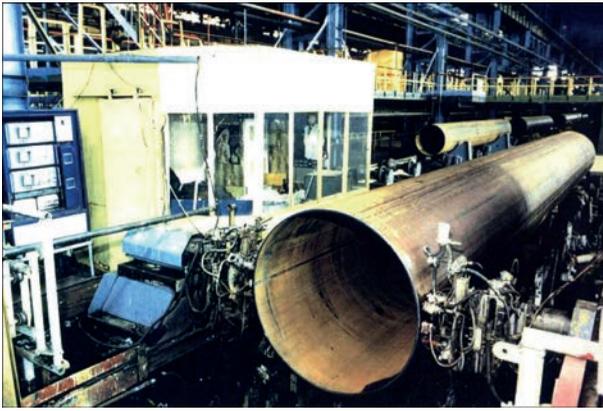


Рис. 12. Участок автоматизированного ультразвукового контроля труб на ХТЗ, оборудованный установкой НК-205

екта, в частности, трубопроводов АЭС. Такие работы проводились на Хмельницкой и Чернобыльской АЭС.

Технология TOFD дает на экране монитора подобные изображения (рис. 10) и используется на различных предприятиях Украины, в частности, на нефтеперерабатывающих заводах, магистральных трубопроводах, АЭС и др.

В ИЭС разработана **технология сканирующего локального намагничивания**, которая существенно расширила возможности применения магнитопорошковой дефектоскопии, обеспечила переход от традиционных способов однонаправленного намагничивания к разнонаправленному, т. е. к активному сканирующему поиску дефектов. В ИЭС выпущена серия таких намагничивающих устройств (НУ) под разные геометрические формы контролируемых объектов с широкими функциональными возможностями (рис. 11). Имеется большой практический опыт внедрения подвижных НУ для НК объектов железнодорожного транспорта (хребтовых балок, боковин тележек и др.). Эти результаты являются

достижениями украинской науки, обеспечивают обнаружение внешних и внутренних трещин на глубине до 20 мм, любой ориентации и опубликованы в ведущих изданиях США, Японии, России.

Ультразвуковой контроль зоны термического влияния сварного шва. В трубах магистральных трубопроводов имеется большое разнообразие происхождения дефектов. Они бывают приобретенные в процессе изготовления и эксплуатации. При изготовлении они могут быть в шве и в зоне термического влияния. Они могут происходить от несовершенства сварки или зоны разделки под сварку. Для снятия этих и подобных вопросов важна отдельная регистрация дефектов шва и зоны термического влияния при сварке труб для магистральных трубопроводов. Для выяснения происхождения дефектов разработана технология автоматизированного ультразвукового контроля (НК-205), показанная на рис. 12, которая внедрена на трубных заводах, включая Харьковский трубный завод.



Рис. 13. Стенд капиллярного контроля



Рис. 14. Старая и новая вентиляционные трубы (а) четвертого реактора ЧАЭС. Капиллярный контроль элементов каркаса новой вентиляционной трубы Чернобыльской АЭС (б)

Капиллярный контроль (КК). Разработаны новые технологические процедуры КК сварных соединений и литых изделий различных узлов машин, механизмов и промышленных объектов. КК может осуществляться цвето-контрастным или люминесцентным методами. Для выполнения КК создан передвижной стенд, оборудованный вытяжкой и средствами для эффективной оценки и контроля (рис. 13). Стенд изготавливается по индивидуальным заказам заводских ЦЗЛ и экспертно-технических организаций.

Использование этого недорогого стенда, содержащего большое количество вспомогательных средств, обеспечивающих надежное обнаружение мелких поверхностных трещин, удобно и при массовой диагностике объектов из любых материалов, для которых применяется КК, например, ультразвуковая очистка поверхности деталей.

На рис. 14 показан пример КК элементов каркаса новой вентиляционной трубы Чернобыльской АЭС, установленной над третьим и разрушенным четвертым реакторами. В каркасе этого сооружения было найдено много трещин, подлежащих ремонту.

Обследования резервуаров различного назначения для хранения нефтепродуктов, жидкого аммиака, спиртов и др. жидкостей (рис. 15) требует применения набора описанных выше разных методов НК.

Среди наиболее интересных практических применений методов НК за последнее время можно выделить следующие работы:

- техническое диагностирование резервуаров в Антарктике на украинской станции «Академик Вернадский» с применением оптоэлектронных приборов для ВИК;
- НЧ УЗК трубопроводов теплотрасс в г. Вишневом и в Институте химии высокомолекулярных соединений НАНУ;
- техническая диагностика трубных конструкций монумента «Родина-мать» Музея истории Украины во Второй мировой войне в г. Киеве;
- сравнительный рентгентелевизионный контроль пластин бронежилетов различных производителей;

- внедрение новых сцинтилляционных экранов для изготовления R-детекторов промышленной радиационной дефектоскопии;

- изготовление цифровых флюороскопических R-преобразователей на основе высокочувствительных астронометрических ПЗС-камер;

- создание и практическое применение для ВИК подвижных оптоэлектронных приборов для установления категории качества (В, С, D) сварных швов по ISO-5817;

- внедрение современных технологий НК на предприятиях черной металлургии, Укрзалізниці и для других отраслей промышленности.

Перспективные научные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона в области НК:

- разработка средств и технологий цифровой радиографии с использованием миниатюрных твердотельных радиационных преобразователей, микроконтроллеров, компьютерной техники и средств автоматизации, создание сканирующих R-систем;

- совершенствование УЗК с использованием цифровых методов обработки информации для воспроизведения размеров внутренних дефектов;

- разработка и внедрение сканирующих намагничивающих устройств для толщинометрии корпусов морских судов и поиска трещин в конструкциях железнодорожного транспорта;

- разработка и внедрение новых технологий и нормативно-методических документов в области теплового контроля объектов длительной эксплуатации;

- объединение результатов различных видов диагностики магистральных трубопроводов и переход от километровой к потрубой системе их учета;

- сочетание контактного и бесконтактного радиационного НК как возможность совершенствования технического обслуживания агрегатов аэрокосмической техники на основе X-ray mini R-технологии и компьютерной цифровой обработки изображений;

- разработка физических основ и технических средств, технологий ВИК металлоконструкций на основе лазеров, оптоэлектронных регистраторов с



Рис. 15. Резервуары жидкого азота и нефтепродуктов, которые периодически диагностируются

записью и обработкой объективной информации о качестве швов.

Стандартизация и профессиональная подготовка дефектоскопистов. ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ активно работает в Техническом комитете ТК-78, поддерживает деятельность Центра сертификации и Аттестационного центра НК, которые адаптируют к условиям Украины международные ISO стандарты по визуальному, магнитному, капиллярному, вихретоковому, тепловому, ультразвуковому, акустоэмиссионному и радиационному контролю. Для Украины важно внедрение международных стандартов и подготовка специалистов в соответствии с национальным (ДСТУ EN ISO 9712) и американским (ASNT SNT-TC-1A) стандартами. Это разные стандарты. Их объединяет стандарт УОНКТД (СТТУ УТНКТД 01-2013), который функционально шире, чем ISO 9712. СТТУ УТНКТД 01-2013 и касается следующих методов НК: ультразвуковой, радиационный, магнитный, капиллярный, вихретоковый, визуальный, контроль герметичности, акустико-эмиссионный, тепловой и вибродиагностический. По основным методам НК в ИЭС выпущены учебные пособия, издается бюллетень «НК-информ», журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Международное сотрудничество. Специалисты ИЭС сотрудничают с Европейской федерацией по неразрушающему контролю (EFNDT), с Международным комитетом по неразрушающему контролю (ICNDT), Международной академией неразрушающего контроля (ANDTI), с Международным обществом по мониторингу технического состояния (ISCM), Американским обществом по неразрушающему контролю (ASNT), с обществами НК Германии, Японии, Великобритании, Польши, Чехии, Болгарии, Хорватии, Италии, США, Кореи и рядом других стран, с Международной организацией ISO, комитетом ТК-135.

Специалисты ИЭС им. Е.О. Патона совместно с организациями из Великобритании, Италии, Испании, Германии, Греции, Болгарии, Бельгии успешно выполнили проект «SHIPINSPECTOR», посвященный выявлению опасных трещин и коррозионных поражений в корпусах судов на основе использования технологий низкочастотного УЗК и ультразвуковых фазированных решеток. Участвовали в выполнении Европейского научного проекта «INNOPIPES», посвященного выявлению коррозионных поражений трубопроводов и разработке новых композитных материалов для их ремонта (7-я рамочная программа ЕС).

Руководитель проф. Троицкий В.А. является членом Международной академии по НК, членом Американского общества по НК, почетным членом национальных обществ НК ряда европейских стран, членом редколлегий журналов «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Методы и приборы контроля качества» (Украина), «Территория NDT» (РФ), «INSIGHT» (Великобритания).

Результаты научных исследований ИЭС опубликованы в ведущих научных журналах Англии, Германии, Японии, США, Польши, РФ, Беларуси, докладывались на многих международных конференциях.

Признанием заслуг ИЭС им. Е.О. Патона в области НК является обучение специалистов из разных стран, желающих повысить свой уровень знаний в области НК. В ИЭС проходили стажировку по методам неразрушающего контроля специалисты из Грузии, Армении, Молдовы, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Польши, Словении, Ирака и других стран.

Работы ИЭС в области НК отражены в следующих публикациях: Патон Б.Е., Троицкий В.А. (2013) Деятельность Института электросварки им. Е.О. Патона в области неразрушающего контроля и технической диагностики. *Территория NDT*, 3, 16–30.; Троицкий В.А. (2017) Радиационный контроль на основе твердотельных миниатюрных детекторов. *Там же*, 1, 30–34; Троицкий В.А., Глуховский В.Ю. (2014) Повышение эффективности телевизионной диагностики опасных и удаленных объектов. *Там же*, 3, 36–40; Троицкий В.А., Карманов М.Н., Горбик В.М. (2015) Опыт применения низкочастотного ультразвукового контроля для мониторинга состояния технологических трубопроводов. *Там же*, 1, 30–33; Троицкий В.А., Глуховский В.Ю. (2014) Определение геометрических параметров дефектов тепловизионным методом контроля. *7-я Международная конференция*. Ивано-Франковск; Троицкий В.А., Дядин В.П., Давыдов Е.А. (2010) Ультразвуковая диагностика эксплуатационных дефектов в конструкциях нефтегазового комплекса. *Автоматическая сварка*, 9, 45–50; Troitskiy V.A. (2015) Multidirectional Local Magnetization of Extended Metal Structures in Magnetic Particle Testing. *J. of Japanese Society for Non-destructive Inspection (JSNDI)*, 64, 2, 80–84; Troitskiy V.A. (2015) New Technology for Magnetic Particle Testing (MPT). *J. the NDT Technician ASNT. Tom Kervina*, 14, 1, 79–80; Troitskiy V.A. (2015) Devices for the Movable Local Multidirectional Magnetization of Metal Structures in Magnetic Particle Testing. *J. Materials Evaluation*, 73, 6, 675–683; Троицкий В.А. (2015) Разнонаправленное локальное намагничивание металлоконструкций при магнитопорошковом контроле. *Территория NDT*, 3, 56–61.

В.А.Троицкий, М.Н.Карманов, И.Я.Шевченко
Поступила в редакцию 16.07.2019