



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Б. Е. ПАТОН, В. А. ТРОИЦКИЙ

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

Показана роль Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины как одной из ведущих научных организаций, сделавших значительный вклад в развитие и становление системы неразрушающего контроля в промышленности. Рассмотрены основные разработки Института в области ультразвукового, радиационного, магнитного и других методов неразрушающего контроля сварных соединений и металлоизделий, которые были успешно внедрены на предприятиях Украины и России. Приведены результаты исследований по развитию современных технологий неразрушающего контроля: TOFD, SAFT, ЭМА, низкочастотного ультразвукового контроля направленными волнами, цифровой радиографии и др. Описана деятельность по гармонизации европейских и разработке национальных стандартов и отраслевых нормативных документов в области неразрушающего контроля. Затронуты вопросы международного сотрудничества в сфере совместных научных исследований и подготовки персонала по неразрушающему контролю в соответствии с международными стандартами. Табл. 3, рис. 26.

Ключевые слова: Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, неразрушающий контроль сварных соединений, разработка неразрушающих методов контроля, разработка национальных стандартов

Развитие сварочных технологий невозможно без использования методов неразрушающего контроля (НК), способствующих повышению качества материалов и сварных конструкций ответственного назначения. Это, в свою очередь, привело к развитию фундаментальных основ дефектоскопии, увеличению количества разработок по НК.

Создание новых технологий сварки должно сопровождаться разработкой новых методов контроля качества: радиационных, оптических, акустических, электромагнитных, магнитометрических, термографических и других. Поэтому одновременно с развитием сварки все эти годы в ИЭС разрабатывались технологии и создавалось оборудование для НК. В этом процессе принимали участие ведущие НИИ и специализированные фирмы России (МНПО «Спектр», НИИмостов, ВНИИСТ, НИИхиммаш, ВНИИНК, ВНИИБТ и др.), Молдовы (ВНИИНК), Англии (TWI), Дании (Force).

К важнейшим направлениям исследований в области применения физических методов НК относятся ракетно-космические и авиационные задачи, которые в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ (ИЭС) решаются совместно с Государственным конструкторским бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, с Объединением «Коммунар», ГП «Антонов». Так, в разные годы были созданы и внедрены технологии НК узлов ракетно-космической техники, автоматизированный УЗ контроль крупногабаритных конструкций, средства и методики оценки герметичности сооружений больших объемов.

Совместно со Всесоюзным институтом буровой техники, фирмой «Зонд», Ивано-Франковским национальным техническим университетом нефти и газа были разработаны технологии и оборудование, которые дают возможность контролировать буровые долота, буровые трубы и их резьбовые соединения. Не менее важными являются разработки по контролю качества в металлургии (трубы и прокат), технологии и оборудование для автоматизированного УЗК, НК при строительстве важных объектов, например, морских трубопроводов, идущих от буровых платформ, и т. п.

Большое значение для развития и распространения физических методов контроля качества имеет просветительская деятельность. В ИЭС работает Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД) – общественная организация, созданная в 1990 г., основной задачей которой является консолидация усилий специалистов в пропаганде возможностей, комплексного решения проблем оценки качества материалов и надежности промышленных сооружений, расширения знаний и международных контактов. Развитию деятельности УО НКТД в значительной мере способствовало Российское общество НКТД. УО НКТД поддерживает деловые связи с аналогичными организациями многих стран мира и является членом Европейской федерации НК (EF NDT), Всемирного комитета НК (IC NDT). При участии УО НКТД в 1995 г. была сформирована программа развития НК в Украине, к выполнению которой были привлечены 26 институтов НАН Украины, многие кафедры вузов и



различные фирмы Украины. На основе этой программы создан ряд отраслевых программ, ее положения вошли в перечень основных направлений развития науки и техники в Украине, в вузах появились специализированные кафедры по НК.

В результате кропотливой работы по пропаганде возможностей физических методов НК, разработке стандартов, организационной работе в Украине создано более 800 предприятий разных форм собственности, выполняющих работы по оценке физическими методами (радиационными, магнитными, акустическими и т. п.) контроль качества материалов и сооружений.

В отличие от Беларуси, Молдовы и России в Украине в советские времена не было специализированных НИИ по проблеме НК качества, поэтому ИЭС как крупный технологический центр взял на себя функции по развитию акустических, радиационных, магнитных, вихретоковых и др. методов оценки качества для решения задач промышленности Украины. В 1955 г. в ИЭС появилась первая специализированная лаборатория физических методов по оценке качества сварных соединений, а впоследствии созданы научный и два конструкторских отдела. Совместными усилиями этих подразделений разработано более сотни проектов, большинство из которых были реализованы в различных отраслях промышленности как в Украине, так и за ее пределами.

Начиная с 1974 г. в ИЭС разработан и внедрен ряд автоматизированных установок ультразвукового контроля (АУЗК) типа У-664, У-175, НК-106, НК-205, НК-180, НК-360, НК-362, предназначенных для контроля качества сварных швов различных металлоконструкций, в том числе труб большого диаметра. Автоматизация повысила производительность НК. Например, скорость контроля с помощью установки НК-106 достигает 20 м/мин. Здесь автоматический УЗК ведется одновременно с помощью шести-восьми преобразователей. Каждый канал имеет блок автоматической отметки дефектных участков. С помощью автоматизированных установок УЗК выполняется проверка сварных швов труб в технологических линиях трубосварочных заводов. Однако объективная оценка качества достигается только при применении нескольких разных физических методов, поэтому внедрялись системы комплексного контроля, состоящие, например, из визуально-измерительного, ультразвукового, рентгеновизионного и электромагнитного и других методов контроля качества.

В период с 1980 по 2000 гг. в ИЭС разработаны технологии контроля узлов ветроэнергетических установок, сварных соединений из легких сплавов и неметаллических материалов для летательных аппаратов, железнодорожных колес (НК-364),

трубопроводов атомных реакторов (НК-321). Созданный в ИЭС комплект тренажеров позволяет осуществлять обучение и аттестацию операторов УЗК. Непрерывно разрабатываются новые технологические возможности физических методов, особенно магнитных, акустико-эмиссионных, ультразвуковых, цифровых, компьютеризированных вихретоковых дефектоскопов и высокочастотных акустических микроскопов и низкочастотных дальнедействующих антенн, позволяющие выполнять оценку качества длинномерных сооружений без сканирования их поверхности, которые нужны практически во всех отраслях промышленности. Ученые отдела неразрушающего контроля ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ постоянно привлекаются для выполнения европейских проектов, таких как:

- выполнение контроля протяженных объектов без сканирования их поверхности с помощью низкочастотных УЗ волн с использованием стенок объектов как волноводов нормальных акустических волн;

- использование бесконтактного возбуждения акустических волн в объекте посредством электромагнитно-акустических преобразователей;

- определение параметров дефектов посредством дифракции акустических волн на острых углах дефектов (TOFD) и синтезированной фокусирующей апертуры (SAFT), обеспечивающей информацию о форме и месте расположения внутренних дефектов.

В ИЭС защищено порядка 15 диссертаций по проблемам использования радиационных, ультразвуковых, магнитных, акустико-эмиссионных и других методов для оценки напряженно-деформированного состояния и наличия дефектов в сварных металлоконструкциях. Эти разработки нашли широкое практическое применение на многих промышленных предприятиях страны. В последние годы введена новая профессия – техническая диагностика, возникшая на стыке проблем НК и надежности.

В ИЭС на протяжении нескольких десятилетий функционируют две исследовательские лаборатории радиационных методов НК. Сотрудники этих лабораторий разработали рентгеновские детекторы с малым содержанием серебра, рентгеновизионные системы, устройства для автоматической расшифровки изображений, портативные дозиметры. В последние годы создано оборудование для цифровой радиоскопии сварных соединений на основе ПЗС-матриц, системы цифровой обработки рентгенограмм, архивирования информации. В ИЭС работает уникальная высокоэнергетическая радиационная лаборатория с биологической защитой до 18 МэВ, в которой проводятся исследования изделий большой толщины (до 80 мм по стали) с использованием мощных рентгеновских



аппаратов и бетатронов, реализуется тангенциальное просвечивание тел вращения и др. (рис. 1, 2). Тангенциальное просвечивание в сочетании с цифровой обработкой информации существенно расширяет возможности радиационных методов.



Рис. 1. Стационарные рентгеновские аппараты РУП 150/300 и «Экстравольт-360»

На рис. 2 представлены фрагменты технологии тангенциального просвечивания тел вращения, позволяющей определять остаточную толщину металла, зазоры между обшивкой и телом трубы и т. п. Пока эта уникальная технология в Украине выполняется только в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Для этого метода разработана цветовая селекция границ радиационного изображения стенок трубы и последующих наслоений, например, теплоизоляции.

На рис. 2, а показан фрагмент цветовой селекции границ радиационного изображения правой стенки трубы и теплоизоляции для отрезка трубы диаметром 60 мм, толщина стенок трубы 5 мм, толщина изоляции 2 мм, H_c – толщина стенки трубы, H_n – толщина теплоизоляции, на рис. 2, б поясняется принцип тангенциального просвечивания, на рис. 2, в, г – получаемая информация. Точность определения толщины стенки трубы при обычной обработке изображений составляет $5 \pm 1,5$ мм. Разработанный алгоритм цифровой обработки изо-

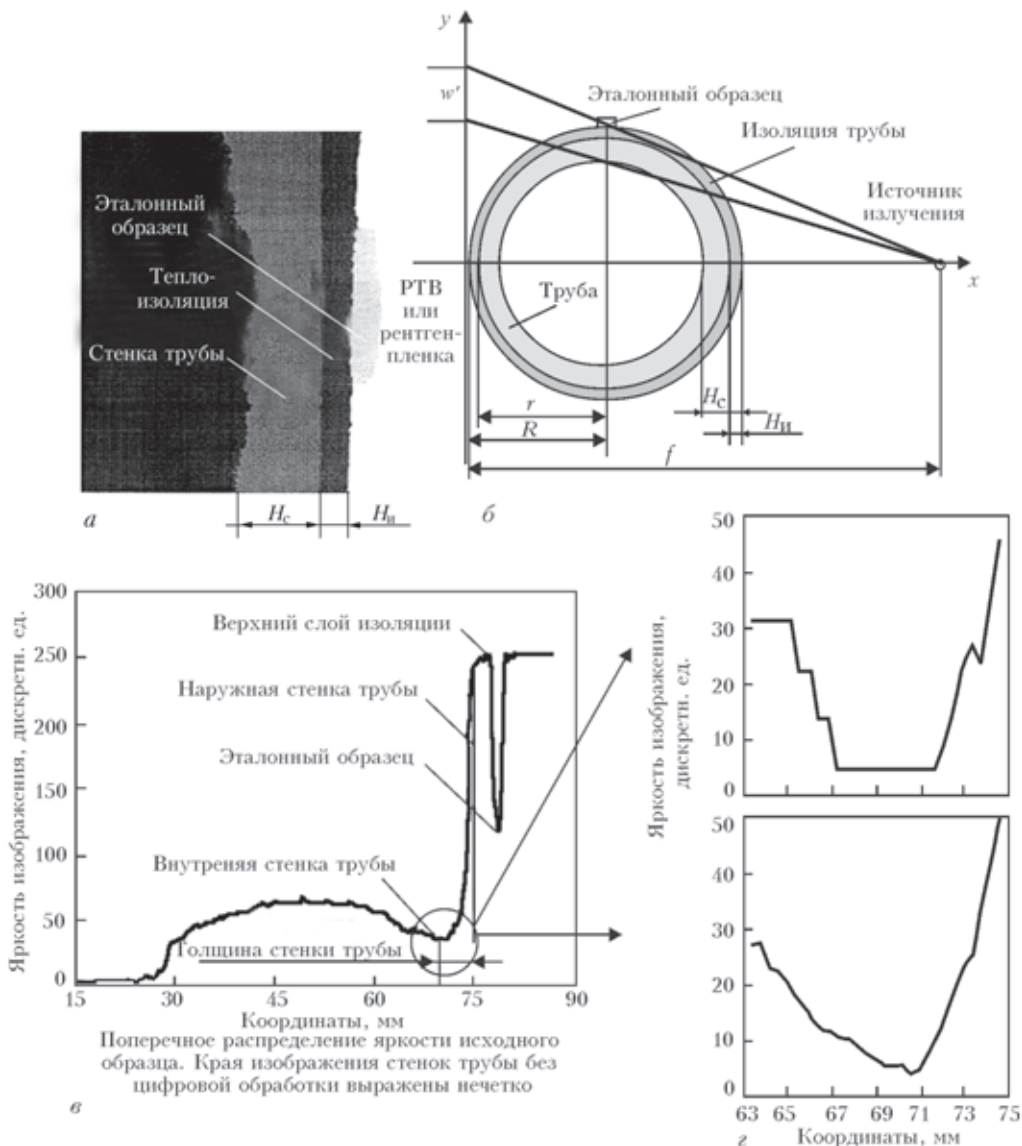


Рис. 2. Фрагменты технологии тангенциального просвечивания тел вращения

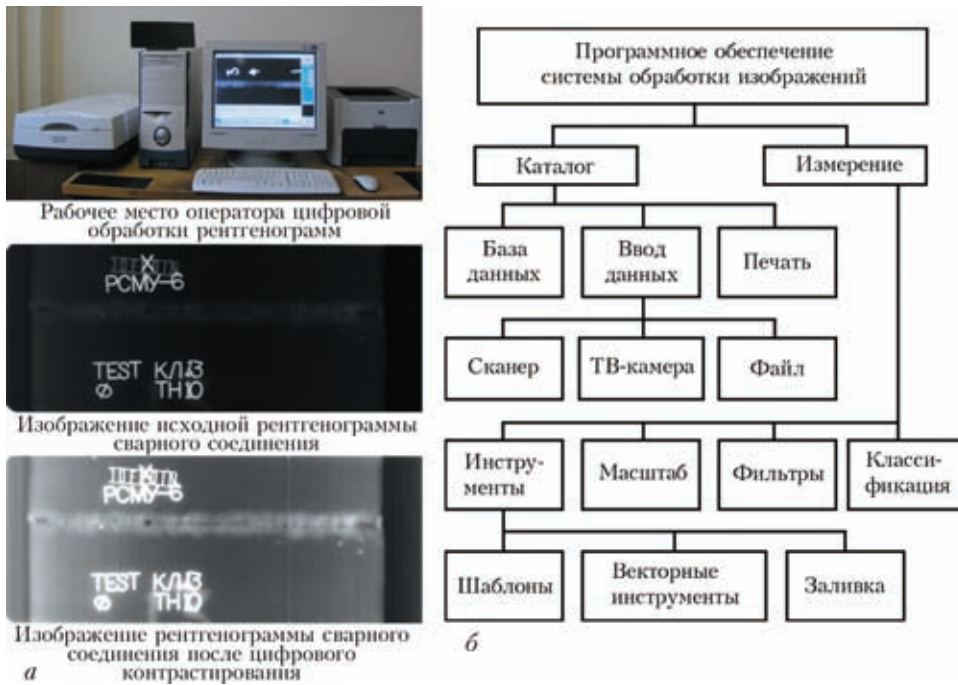


Рис. 3. Система цифровой обработки изображений (а) и структурная схема программного обеспечения системы цифровой обработки рентгенограмм (б)

бражений обеспечивает повышение точности измерений толщины стенки трубы $5 \pm 0,2$ мм.

Важнейшей процедурой радиационного контроля является расшифровка и архивирование его результатов (рис. 3).

Возможности разработанного комплекса цифровой системы обработки информации:

- сканирование изображений с высокой разрешающей способностью, которое позволяет обнаруживать трудно выявляемые дефекты;
- независимое масштабирование изображений;
- непосредственное измерение длины отрезка или ломаной линии, а также периметра и площади дефекта;
- инвертирование, обращение в зеркальное отображение изображений;
- запоминание произвольного количества интерпретаций обработки изображений;
- сохранение исходных и обработанных изображений, а также сопутствующей текстовой информации в компьютерной базе данных;
- архивирование и документирование результатов контроля;
- повышение достоверности и эффективности радиационного контроля.

В радиационной дефектоскопии значительным успехом была разработка фундаментальных понятий детерминированной и статистической оценки этих результатов. Впервые разработаны статистические эталоны, обеспечивающие более объективную оценку качества, чем детерминированные эталоны, которыми пользуются во всем мире. При оценке качества радиационного изображения с помощью статистических эталонов оператор не

знает расположения и размеров искусственных дефектов.

В разные годы в ИЭС были созданы и внедрены: бесконтактный магнитоакустический дефектоскоп для комплексного контроля гильз цилиндров тракторных двигателей, многоцелевой магнитный дефектоскоп для сварных соединений сложной формы, дефектоскоп на основе сварочного источника, подвижные намагничивающие устройства, работающие на постоянных магнитах из редкоземельных металлов и др.

Оригинальные разработки выполнены в области вихретокового контроля, созданы манипуляторы (НК-331) и зонды для контроля теплообменных трубок парогенераторов и других объектов атомных электростанций. Для оценки герметичности разработан ряд установок и комплектов оборудования для трубопроводов, резервуаров, защитных оболочек. Многие годы совершенствуются комплекты накладных вакуумных камер для листовых и угловых конструкций (рис. 4, а). Такие вакуумные камеры производятся серийно и изготавливаются многими производителями. Эта простая технология требует глубоких знаний происходящих при этом процессов. Высокое разрежение не позволяет выявлять крупные дефекты, при низком не обнаруживаются мелкие дефекты. На основе многолетнего опыта эта технология была доведена до совершенства и автоматизированы ее основные процедуры. На рис. 4, б показана схема вакуумной установки для контроля герметичности сварных соединений труб газовых магистралей. Предложен способ регистрации течей с помощью УЗ в вакуумных камерах, заполненных



водой, разработаны сенсоры для контроля герметичности на базе различных физико-химических явлений. Сварные соединения должны быть не только прочными, но и герметичными (рис. 5). Поэтому проблемы оценки герметичности сварных соединений ответственных изделий ядерной, космической, бытовой техники постоянно требуют конкретных технических решений, над которыми много и успешно работают ученые института.

Для контроля труб теплообменников диаметром 18...26 мм и других труднодоступных для визуального контроля объектов созданы телеэндоскопы с ПЗС-камерой высокого разрешения, установленной на конце телескопической штанги. В последние годы видеоскопы широко применяются во всем мире за счет высокой функциональности

и эффективности в различных отраслях промышленности. Созданным в ИЭС эндоскопом можно диагностировать трубки протяженностью до 14 м.

Создан ряд технологий для измерения различных покрытий, наплавов и фактической толщины металлов, пластика и композитов с внутренней эрозией (рис. 6). Для этих целей относительно недавно найдены интересные решения на основе магнитооптического метода визуализации (МОВ). Средства контроля на основе этого метода кроме дефектов дают информацию об остаточных магнитных полях на поверхности ферромагнитных материалов. Метод МОВ нашел применение в криминалистике. Исследования показали, что он может использоваться и в технике для оценки качества прецизионной обработки поверхностей полированных болтов крепления мощных турбин, поверхности клапанов и их седлаищ мощных двигателей и т. п. Это наиболее точный метод, выявляющий как тонкие дефекты, так и локальные нагружения металла. На рис. 7, 8 показана принципиальная схема МОВ и сравнительные результаты с другими методами (визуальным, капиллярным, магнитопорошковым).

МОВ основан на визуализации топографии магнитного поля рассеивания дефектов с помощью феррит-гранатовой пленки, структура магнитных доменов которой чувствительна к незначительным внешним магнитным полям.

Исследованы способы магнитооптического контроля проката и сварных соединений как с помощью промежуточного носителя информации (магнитной ленты), так и с помощью магнитооптического преобразователя. Магнитооптический метод позволил выявлять мелкие дефекты, которые «не видят» другие методы.

Важной особенностью МОВ с лазерно-оптической визуализацией магнитных полей является представление в реальных размерах как поверх-

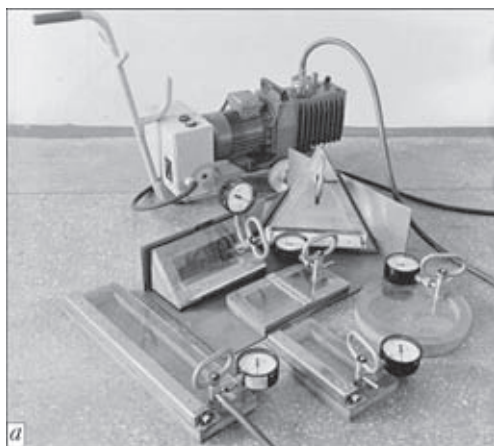


Рис. 4. Комплекты накладных вакуумных камер для листовых и угловых конструкций (а) и схема вакуумной установки для контроля герметичности сварных труб (б)

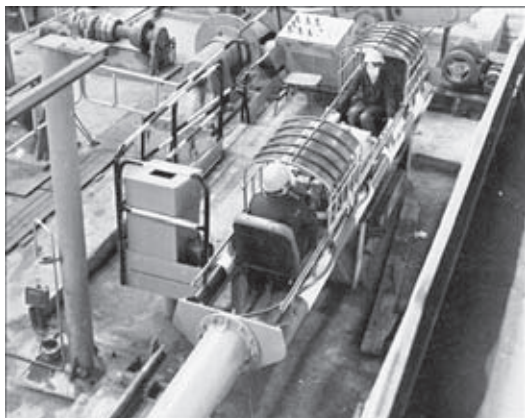


Рис. 5. Установка с двумя операторами, определяющая изнутри герметичность труб по схеме, показанной на рис. 4, б



Рис. 6. Применение вихретоковых, феррозондовых, магнитометрических приборов

ностных и подповерхностных дефектов, так и локальных нагружений структуры металла. Из рис. 8 следует, что этот метод более чувствителен, чем традиционные методы для поверхностных исследований.

Беспорным достижением последних лет является создание портативного цифрового рентгенотелевизионного оборудования (рис. 9) на основе высокочувствительных ПЗС-матриц и флуоресцирующих CsI экранов. Портативность, наличие

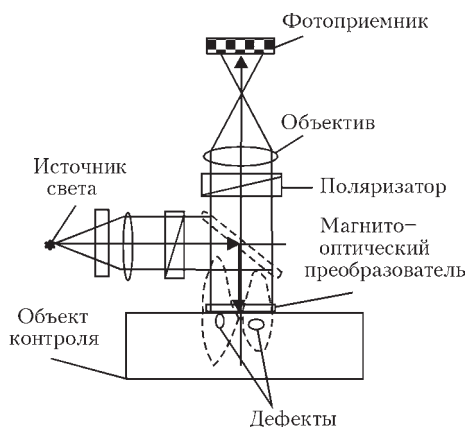


Рис. 7. Принципиальная схема МОВ

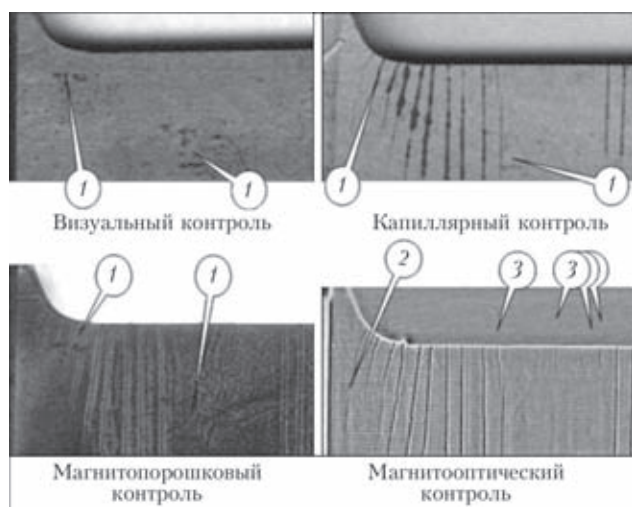


Рис. 8. Сравнение результатов, полученных различными методами контроля: 1 и 2 – световые пигментации (шумы объекта) и мелкие трещины, визуализированные всеми сравниваемыми методами; 3 – особо мелкие трещины, выявляемые только магнитооптическим методом



Рис. 9. Применение портативного цифрового рентгенотелевизионного оборудования: а – размещение аппаратуры на объекте; б – анализ результатов контроля на экране ноутбука

цифровой обработки изображений, низкая стоимость открывают новые возможности для выполнения радиационного контроля в полевых и цеховых условиях многих объектов, которые в настоящее время не обеспечены возможностями НК.

Так, многочисленные газо-, нефте- и гидрораспределительные трубопроводы малого диаметра, технологические трубопроводы нефтехимического производства в настоящее время как в Украине, так и в России практически не проверяются на наличие внутренних дефектов из-за высокой стоимости пленочной радиографии, физических ограничений УЗК для тонкостенных объектов большой кривизны. Внедрение в ближайшие годы средств портативного РТК решит эту проблему. Данная система портативного РТК позволяет выполнять рентген-контроль на порядок дешевле и быстрее, чем при рентгенографии.

В последние десятилетия широкое распространение получили разработанные в ИЭС подвижные намагничивающие устройства на постоянных магнитах (рис. 10). Они существенно потеснили электромагниты, поскольку при этом на порядок уменьшились масса и стоимость оборудования НК, повысилась производительность контроля и возможность сканирования, поиска дефектов. На этой основе в ИЭС разработана серия подвижных переставляемых (рис. 10, а) и вращающихся (рис. 10, б) намагничивающих устройств, которые на порядок повышают производительность МПК протяженных сварных соединений и обеспечивают выявление дефектов разной ориентации, причем вращающиеся магниты имеют гладкую поверхность с подвижным контактным роликом. ИЭС имеет приоритет в этом направлении, производителем подвижных намагничивающих устройств до сих пор остается только ИЭС им.Е.О.Патона.

На рис. 11 показаны эпизоды деятельности сотрудников ИЭС по НК различных объектов. Это мостовые перекрытия (рис. 11, а), в которых обнаружены большие расслоения, элементы тяжелого оборудования (рис. 11, б, в), работающего под высоким давлением, различные трубопроводы

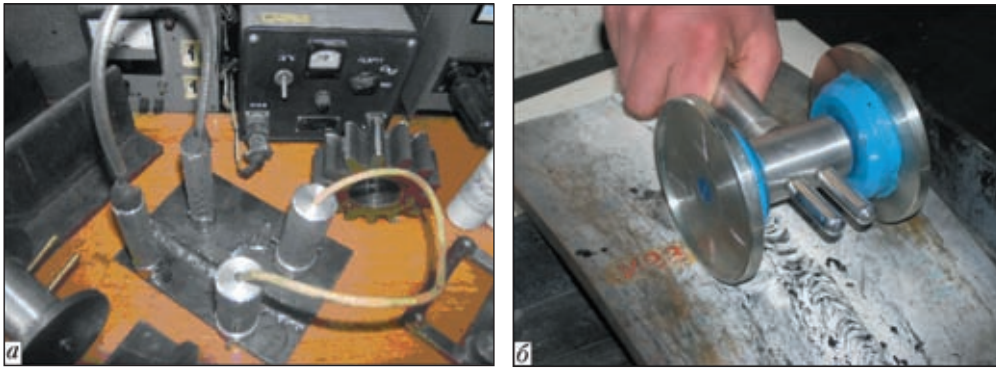


Рис. 10. Подвижные намагничивающие устройства на постоянных магнитах (описание см. в тексте)

(рис. 11, *з-и*), узлы компрессорных станций, различные металлоконструкции. В Украине практически нет ни одного значительного сооружения, где бы в той или иной мере не был использован потенциал ИЭС по НК сварных соединений.

Разработка новых и совершенствование существующих технологий УЗК является одной из основных задач дефектоскопии. За последние десятилетия много сил потрачено на внедрение УЗ-технологий и средств для реализации УЗ волн дифракции (метод TOFD). Это метод точного определения расположения и размеров остроконечных

внутренних дефектов, который состоит в следующем (рис. 12). Два ультразвуковых преобразователя (излучатель и приемник) располагаются навстречу один другому. Излучатель возбуждает продольную волну в широком угловом диапазоне.

УЗ-волны на приемник попадают в следующей последовательности: головная волна; волна, дифрагированная на верхней кромке трещины; волна, дифрагированная на нижней кромке, волна, отраженная от донной поверхности.

Преимущество этого метода заключается в том, что дифрагированная на кромке трещины



Рис. 11. Эпизоды деятельности сотрудников ИЭС по НК различных объектов (описание см. в тексте)

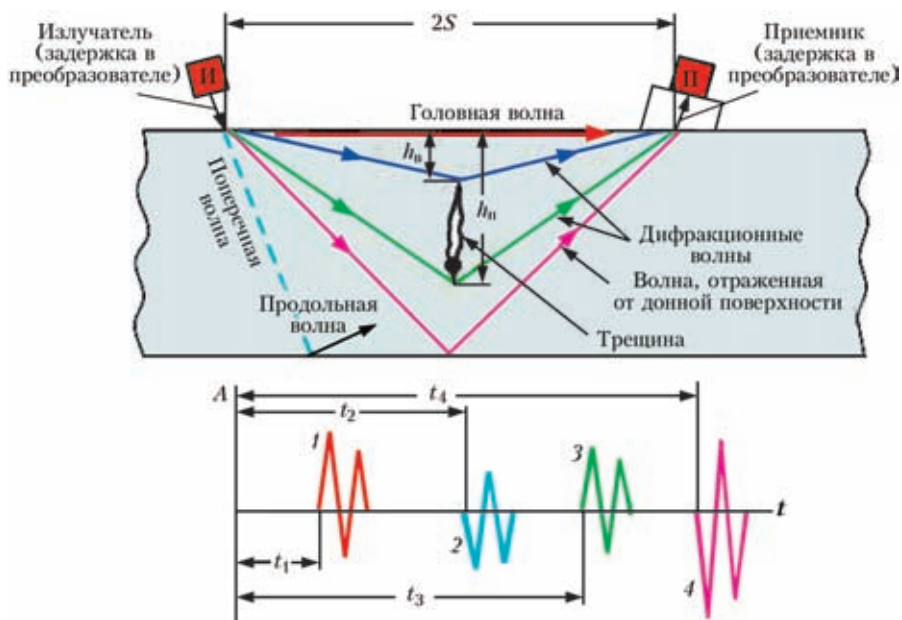


Рис. 12. Схема метода TOFD: 1 – сигнал головной волны; 2,3 – сигнал, вызванный дифракцией соответственно на верхней и нижней кромке трещины; 4 – донный сигнал; t – задержка времени между излучением и приемом сигналов от соответствующих УЗ волн

волна излучается в широком угловом диапазоне и поэтому положение приемника по отношению к трещине не является таким критичным, как для традиционных методов УЗК. Вторым преимуществом этого метода является не амплитудный, а временной способ оценки размеров и расположения внутренних дефектов.

Недостатком традиционного УЗК, выполняемого с помощью вибрации пьезопластин, является необходимость в промежуточной среде между излучателем УЗ-колебаний и объектом контроля. Обычно это жидкая среда (вода, масло, гель). Часто проблемы в контактной среде (пузырьки, плохое смачивание и т. п.) индицируются при УЗ-контроле как дефект. Это особенно часто встречается при быстродействующем автоматизированном УЗК. Решить эту проблему удалось за счет электромагнитоакустического (ЭМА) возбуждения УЗ колебаний.

В отличие от пьезотехнологии, ЭМА возбуждение УЗ-колебаний производится с помощью силы Лоренца, возникающей внутри металла:

$$F = \frac{J(z,t)B_y}{n}$$

где n – плотность электронов; B_y – индукция; $IW(t)$ – ампервитки катушки W возбуждения; $J(z, t)$ – ток, наведенный в контролируемой среде (рис. 13).

В 1980-х гг. над созданием технологий и оборудования для НК многослойных обечаек, для которых было недопустимо применение контактных жидкостей, встал вопрос ввода в металл УЗ-колебаний бесконтактно. Пришлось отказаться от пьезопластин и разработать электромагнитный метод ввода в металл УЗ-колебаний. Эту работу сотрудники ИЭС выполняли совместно с Всесоюзным ин-

ститутот неразрушающего контроля (ВНИИНК). На рис. 13 показан ЭМА-принцип, а на рис. 14 – схема ЭМА-преобразователя, который состоит из магнита 1, концентраторов магнитного поля 2, катушки возбуждения 3, протектора 4, воздушного зазора 5. Сейчас ЭМА-технологии широко применяются при АУЗК.

Кроме сказанного, ЭМА-метод возбуждения позволяет при УЗК сварных швов:

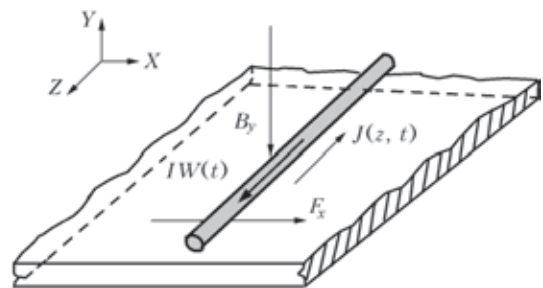


Рис. 13. Схема ЭМА-принципа

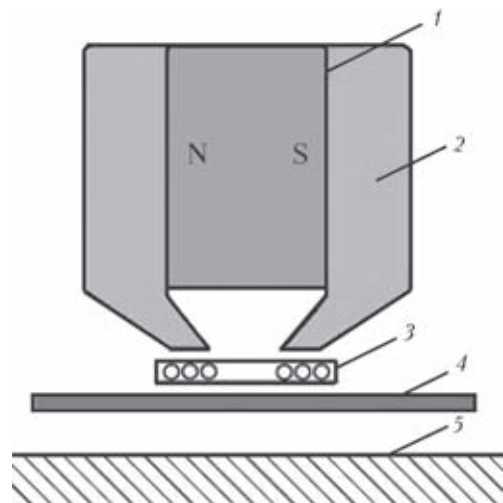


Рис. 14. Схема ЭМА-преобразователя (описание см. в тексте)

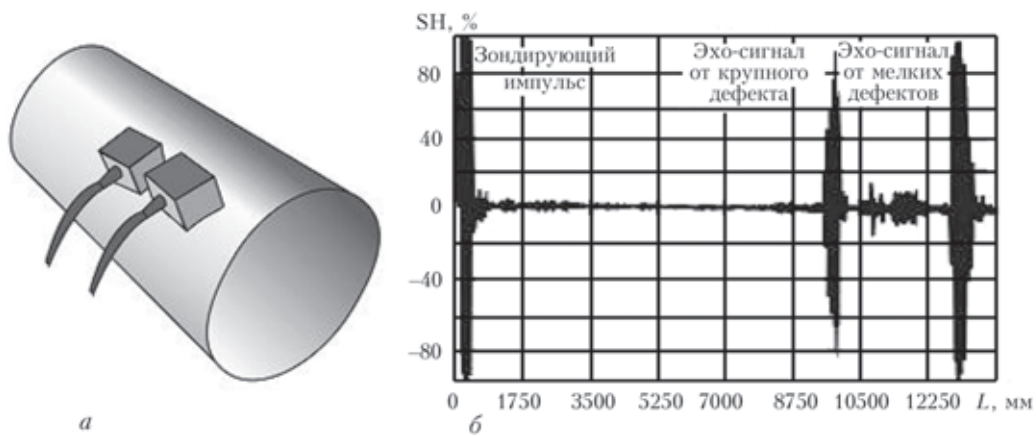


Рис. 15. ЭМА-преобразователи на поверхности трубы (а) и дефектограмма, показывающая наличие в трубе дефектов (б)

- создавать УЗ-колебания SH-поляризации, исключая влияние на результаты УЗК краев валика усиления и провисания металла шва;
- проводить УЗК соединений металлоконструкций из тонкого металла частотой до 1,5 МГц, которые с помощью пьезопреобразователей не могут быть проконтролированы;
- оставлять на поверхности контролируемого изделия остатки изоляции, брызг и т.п., т.е. для контроля не нужна тщательная подготовка поверхности, так как уровень очистки поверхности изделия не оказывает влияния на результаты УЗК методом ЭМА;
- выполнять УЗК при высоких и низких температурах поверхности; в полевых и экстремальных условиях, не дожидаясь остывания металла;
- проводить УЗК без контактной жидкости при наличии зазора между преобразователем и объектом контроля.

На рис. 15 показаны два ЭМА-преобразователя на поверхности трубы (а) и дефектограмма, показывающая наличие в трубе дефектов (б). В ИЭС было разработано несколько проектов реализации магнитоакустического контроля. Этот метод получил распространение для УЗК объектов с высокой температурой поверхности и используется при больших скоростях контроля.

Важной особенностью цифровых методов обработки УЗ-информации явились разработки по визуализации толщинометрии, рельефа обратной стороны (недоступной для контакта) металлоконструкции. На рис. 16 показаны три направления (теневое, с торца и со стороны) представления информации после обработки всех сигналов УЗ, отражающихся от объекта. Так, получают изображение внутренних дефектов в трех (рис. 17) ракурсах, устанавливается рельеф коррозионного поражения внутренней недоступной стороны объекта. Например, вид дефекта с трех сторон, в трех координатах. По характеру расположения отраженных сигналов устанавливают наличие расщепления (рис. 18) и другие дефекты.

Начиная с 1960-х гг., в период начала создания цехов по производству труб высокого давления для магистральных газопроводов создано большое количество установок АУЗК для Харцызского, Выксунского, Челябинского и др. металлургических и трубопрокатных заводов. На рис. 19 показана принципиальная схема установки АУЗК У-664, разработанной для Харцызского трубного завода.

Эффективность НК по-прежнему относится к важным вопросам деятельности института. На рис. 20 показан фрагмент дискуссии по вопросам АУЗК в отделе НК ИЭС с участием академика Б. Е. Патона.

При массовом производстве ответственных конструкций надо было применять различные методы и средства НК, а также непрерывно вести анализ появления дефектов и на этой основе совершенствовать сварочные технологические решения. От уровня ответственности объекта зависят объемы и последовательности процедур НК (рис. 21). Ответственные металлоконструкции типа труб магистральных газопроводов на заводах-изготовителях проходят полный цикл НК-испытаний дважды: до и после экспандирования и гидроиспытаний.

На Харцызском трубном заводе, Выксунском металлургическом заводе, Челябинском трубопрокатном заводе внедрены технологии НК при производстве труб большого диаметра, предназначенных для газопроводов до 100 атм. И на протяжении всего времени применения этих технологий сотрудники ИЭС ведут наблюдения, осуществляют непрерывный процесс совершенствования системы

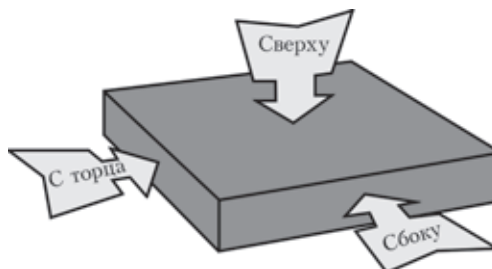


Рис. 16. Три ракурса представления информации об объекте

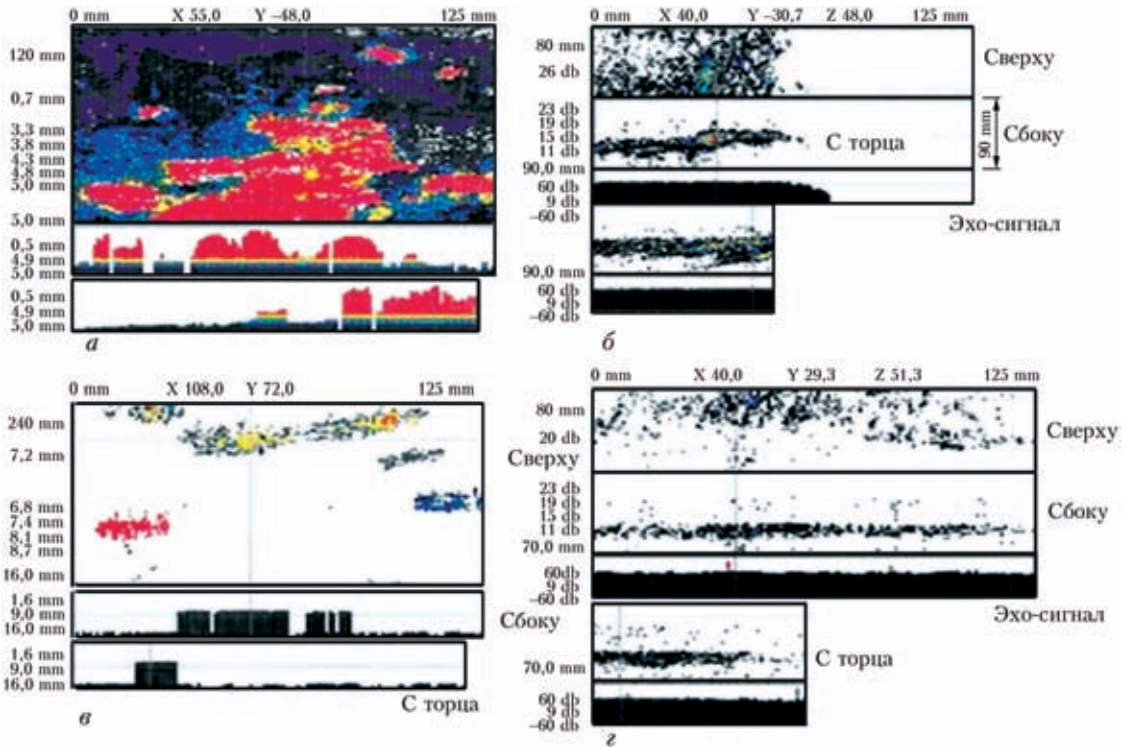


Рис. 17. Остаточная толщина металла сосуда с внутренним коррозионным поражением (а); распределение сигналов при наличии коррозионного поражения внутри металла (гиба паропровода) (б); вид сверху, сбоку и с торца для металла с расслоением (в); распределение УЗ-сигналов питтинговой коррозии внутри металла, каждый отдельный дефект допустим, а металлоконструкция снята с эксплуатации (г)

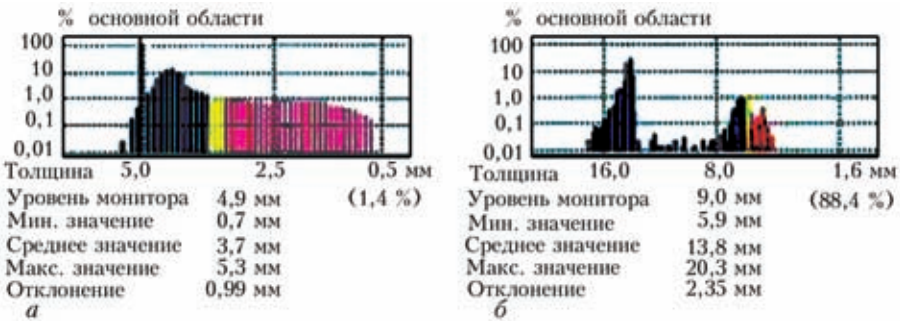


Рис. 18. Распределение УЗ-сигналов: а – при коррозионном поражении; б – при расслоении

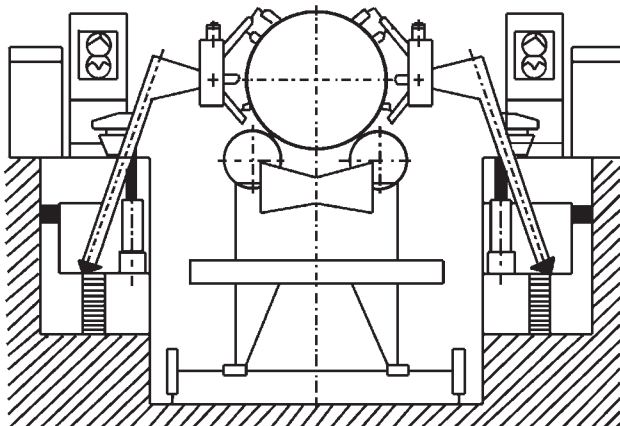


Рис. 19. Принципиальная схема установки АУЗК У-664



Рис. 20. Дискуссия по вопросам АУЗК с участием Б. Е. Патона



НК с расширением возможностей взаимодействия методов и введением новых решений. Поэтому, как показывает анализ аварий на газотранспортных системах, первопричиной разрушений преимущественно являются монтажные, а не заводские сварные швы. Этот вывод является результатом постоянного анализа весовых соотношений дефектов различного вида и размеров при изготовлении труб, текущего уровня их дефектности. Так, оценивают динамику качества, определяют правомерность использования выбранной технологии сварки. Таким образом, происходит поддержание высокого качества продукции (труб), которое многократно оценивается рентгеновским, магнитным и ультразвуковым контролем (табл. 1).

Анализ количественного соотношения дефектов различного вида в сварных соединениях труб большого диаметра показывает, что более 80 % дефектов – объемные. Это поры и шлаковые включения. Относительное количество наиболее потенциально опасных плоскостных дефектов (непроваров и трещин) составляет около 10 %. Плоскостные дефекты увеличивают раскрытие после экспандирования и гидроиспытаний, так как в процессе этих процедур растягивающие усилия достигают 0,9 предела текучести. Поэтому трубы для газопроводов после экспандирования и гидроиспытаний проходят повторный полный цикл НК. Причем на сдаточном УЗК поперечных трещин обнаруживается в 2...10 раз больше, т. е. трещины после экспандирования раскрываются сильнее непроваров. Для того, чтобы внедрить такой большой объем НК потребовались многие годы и изнурительные доказательства важности расширения системы НК, насыщения ее разными методами.

Технология НК в трубосварочном производстве предполагает исследования дефектных участков также с помощью ручного УЗК, пленочной радиографии, дополняющей рентгенотелевизионный метод, и металлографии, магнитопорошкового, вихретокового методов (по желанию заказчика). Ручным УЗК подтверждается 86 % дефектов, из которых недопустимых приблизительно 28 %.

Критерием истины считается радиография. Исследования дефектных участков с помощью пленочной радиографии и металлографии показали, что результаты УЗК подтверждаются большим процентом недопустимых дефектов. По отражающей способности естественные дефекты различны. Например, мелкие строчечные включения в основном металле дают гораздо большую амплитуду эхо-сигнала, чем подлежащие обязательному исправлению шлаковые включения и поры в шве. Поэтому, с одной стороны, амплитуда эхо-сигнала при УЗК не является однозначной мерой оценки мест отражения, а, с другой, чувствительность контроля не может быть 100%-ной, без пропуска дефектов, подлежащих исправлению. Следовательно, философия допустимости труб к эксплуатации должна постоянно трансформироваться.

Результаты основных средств АУЗК и РТК зависят от многих обстоятельств. В табл. 2 приведены количественные соотношения дефектов, полученные при близких технологических процессах в трубах из сталей марок X-70, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ. Видно, что больше всего труб (до 40 %) забраковано при АУЗК труб из стали марки 10Г2ФБ. В то же время после РТК отправлено на ремонт всего 16,7 % труб. АУЗК фиксирует, что большое количество дефектов связано с плохим качеством металла исходного листа, наличием на кромках



Рис. 21. Полный цикл контроля труб магистральных трубопроводов

Т а б л и ц а 1. Количественное соотношение труб с различными дефектами (ТРД) и количество образующихся в трубах дефектов определенного вида (ТДОВ) на сдаточном и технологическом участках НК трубного завода (данные взяты из годовой программы около 200000 шт. газовых труб)

Вид дефекта	ТРД, % (до)	ТДОВ, % (до)
Непровар	2,0	10,0
Поры + шлаки	1,5	4,0
Поры	13,0	50,0
Шлаки	4,0	18,0
Трещины продольные	0,1	0,5
Трещины поперечные	0,1	0,5
Прожоги	0,1	0,5
Другие дефекты	4,0	16,0

Т а б л и ц а 2 . Количественные соотношения дефектов в трубах, полученные при близких технологических процессах

Результаты НК	Технологический участок НК			Сдаточный участок НК		
	X-70	09Г2ФБ	10Г2ФБ	X-70	09Г2ФБ	10Г2ФБ
Проконтролировано труб АУЗК, шт.	8594	5485	2900	8784	5095	2583
Трубы, забракованные АУЗК, %	19,4	16,2	40,0	20,0	11,7	21,1
Проконтролировано труб РТК, шт.	3048	1164	1318	3170	775	779
Отправлено на ремонт по РТК	23,6	33,7	16,7	4,8	5,4	1,8
В том числе труб по видам дефектов, %						
Непровар	0,8	1,2	0,5	0,2	0,2	-
Непровар на конце трубы	0,3	0,6	0,5	0,06	0,2	-
Поры + шлаки	0,7	1,5	0,7	0,09	-	0,1
Поры	15,4	21,6	9,3	3,8	4,3	1,0
Шлаки	2,6	2,7	3,0	0,3	0,4	0,3
Трещины поперечные	0,2	0,2	0,08	0,09	0,1	0,3
Трещины продольные	0,07	-	-	0,2	0,2	0,1
Прожоги	0,2	0,2	0,2	0,06	-	-
Другие дефекты	3,3	5,6	2,6	-	-	-

расслоений и раскатанных строчечных включений металлургического характера.

Дефекты типа строчечных включений, имея хорошие отражательные свойства для ультразвука, дают повышенный процент браковки труб. В то же время, располагаясь на пути УЗ волны, они рассеивают УЗ колебания и могут «маскировать» дефект, ухудшая его выявляемость.

Начиная с 1970-х гг., работы по автоматизации УЗК и совершенствованию системы НК не останавливались ни на один день – они велись совместно с ВНИСТ, ВНИИНК и др. НИИ. Непрерывно совершенствуется элементная база, внедряются компьютеризированные цифровые методы и средства обработки информации (рис. 22).

Вскоре после событий на Чернобыльской АЭС был принят ряд европейских программ по изучению и преодолению последствий этой аварии. Сотрудники ИЭС принимали активное участие в их выполнении, помогали восстанавливать и запускать в 1986 г. третий реактор на ЧАЭС, контролировали качество сооружаемых трубопроводов и других металлоконструкций в зоне ЧАЭС, изготавливали дозиметры, внедряли дозиметрию про-



Рис. 22. Фрагмент настройки промышленных установок автоматизированного УЗК на эталонной трубе

дуктов в прилегающих к ЧАЭС районах. Одной из программ ЕС, связанной с трагедией на ЧАЭС, было внедрение европейских правил и средств НК ответственных металлоконструкций на основе датской системы Р-scan (рис. 23), внедрение которой в Украине сыграло важную роль в развитии цифровых компьютеризированных систем в Советском Союзе.

Для изучения этих правил большая группа сотрудников ИЭС проходила стажировку в Копенгагене (Дания) в Институте Force и получила международные сертификаты. Со временем появились подобные отечественные системы. На рис. 23 показаны фрагменты системы Р-scan, используемой в ИЭС с 1988 г., и процесс ее изучения болгарским специалистом, выполняющим межгосударственную программу развития технологий НК для АЭС.

Одним из важнейших достижений ИЭС являются работы по изучению возможностей низкочастотного (НЧ) дальнего действия УЗК, позволяющего изучать длинномерные конструкции без сканирования их поверхности (рис. 24).

НЧ УЗ-система для определения коррозионного износа и других крупных повреждений трубопроводов дает возможность оценивать техническое состояние всего объекта в обе стороны от места расположения антенны. В основу действия системы положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн, способных распространяться на большие расстояния. При этом обнаруживаются коррозионные поражения и другие дефекты потери металла, глубина которых не менее 10 % толщины стенки трубы на расстоянии до 100 м.

На рис. 25 показана схема контроля экспериментального трубопровода протяженностью 48 м, состоящего из шести труб с искусственными



Рис. 23. Система P-scan

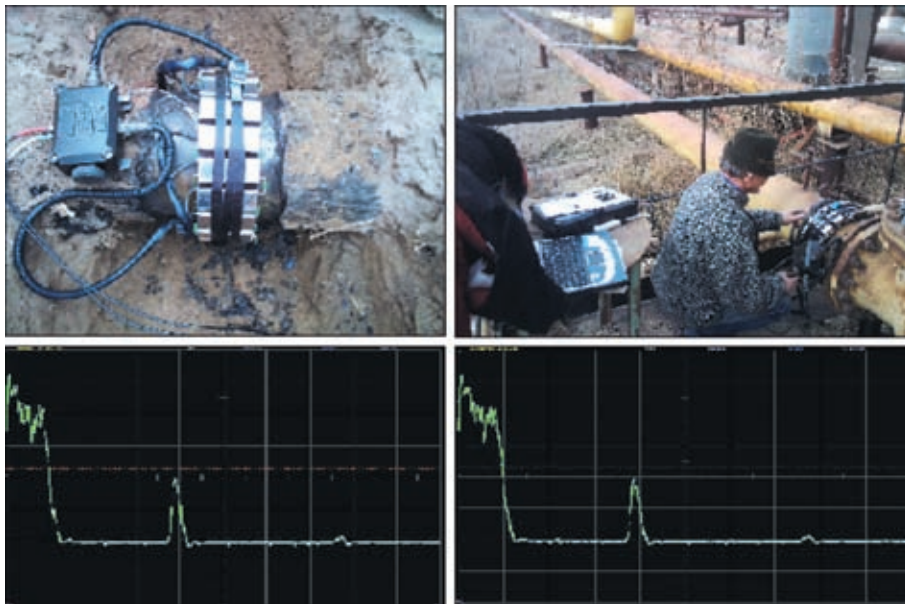


Рис. 24. Антенна на трубе тепломагистрали, с помощью которой производят УЗК трубопровода без сканирования ее поверхности

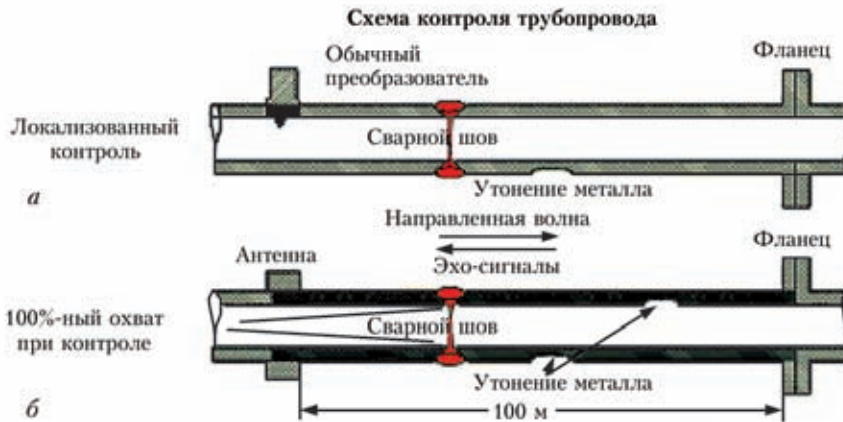
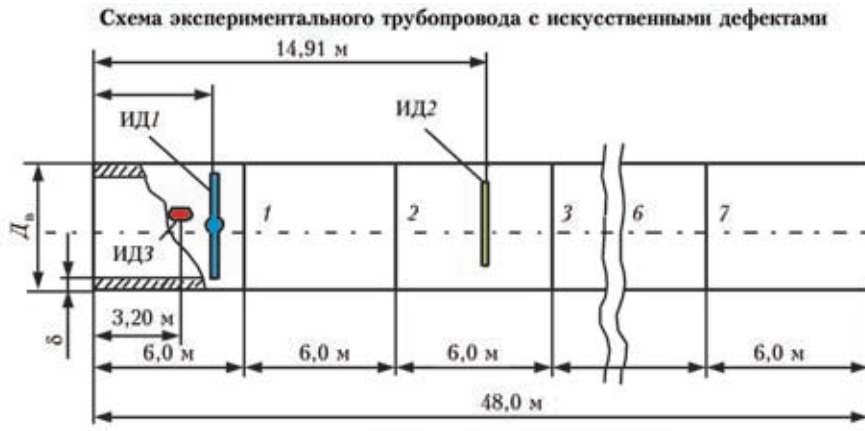
дефектами, экспериментальная установка и дефектограммы трубопровода. Начало этого перспективного научного направления в дефектоскопии было положено в 2004 г. Позже с этими разработками сотрудники ИЭС приняли участие в выполнении программы европейского проекта LRUT, в котором под руководством английского Института TWI также приняли участие ученые из 11 стран Европы. На рис. 25 показано разработанное оборудование, установленное на трубах. Приняты следующие обозначения: 1–7 – сварные швы; ИД1, ИД3 – искусственные дефекты: ИД1 – прорез со сквозным отверстием, ширина прореза 2,5 мм, глубина 2,5 мм, длина $0,5L$, где L – длина окружности трубы, диаметр отверстия 10 мм; ИД2 – прорез шириной 2,5 мм, глубиной 2,5 мм, длиной $0,3L$; ИД3 – коррозионное поражение длиной 0,18 м, шириной 0,1 м. На дефектограмме видны все монтажные кольцевые соединения (разные по качеству), все искусственные упомянутые выше дефекты.

Первые стандарты по НЧ методу контроля начали появляться совсем недавно: итальянский стандарт UNI/TS 11317 – 2009 г., японский стандарт JIS – NDIS 2427 – 2010 г. и американский ASTM E2775-11 – 2011 г. Сейчас НЧ диагностика

– один из наиболее быстро развивающихся методов НК трубопроводов.

На западный рынок выходит уже третье поколение этих систем. Прошла эйфория об универсальности НЧ УЗК. Уже четко определены ограничения применения этого метода и зоны ее наиболее эффективного использования. Есть принципиальные отличия от обычной УЗ-дефектоскопии. Этот метод не позволяет напрямую определять локальные изменения толщин стенок и внутренние неоднородности контролируемого объекта по времени прохождения отраженного сигнала. Изменения толщин стенок в данном случае определяются не временем, а характером отраженного сигнала (его амплитудой, формой), а время появления отраженного сигнала соответствует расстоянию от антенны до дефектного участка. Здесь действует иная интерпретация результатов контроля. Полезный сигнал от дефекта может маскироваться многократно превосходящими его по амплитуде сигналами от сварных швов, фланцев, колен трубы, ответвлений. Эхо-сигнал значительно ослабляется при отражении от дальних участков трубопроводов.

Неоспоримое преимущество длинноволнового метода НЧ контроля – это возможность



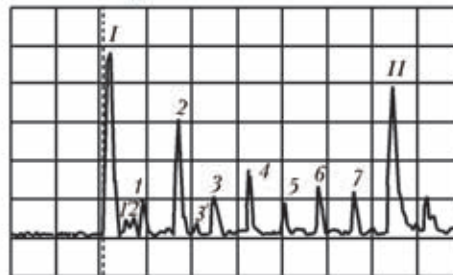
Методика проведения контроля длинноволновым УЗК

1. Установка антенны датчиков на трубопровод
2. Направленное прозвучивание трубопровода с одной точки
3. Выдача диаграммы контроля и предварительных результатов с указанием дефектов

Рабочее место оператора УЗ-контроля



Излучения с конца трубы, крутильная волна



I – начальный (зондирующий) сигнал
II – эхо-сигнал от торца трубы
1 – *7* – эхо-сигналы от сварных соединений

1', *2'*, *3'* – эхо-сигналы от искусственных дефектов ИДЗ, ИД1, ИД2 соответственно

Рис. 25. Схема контроля экспериментального трубопровода: *a* – обычными методами; *б* – длинноволновым УЗК

достаточно быстро выявлять наиболее критические участки трубопроводов без сканирования их поверхности, без их вскрытия и выкапывания, что особенно важно в труднодоступных участках. Поэтому в первую очередь такие системы в Украине используют для диагностики:

- пересечения трубопроводами дорог; прохождения их через стену;
- однотипности монтажных кольцевых швов секции труб, которых может быть несколько десятков;
- в случае использования разных типов опор с

зонами коррозионного поражения;
 – коррозии под изоляцией и т. п.

Сравнительные результаты измерения координат искусственных дефектов на трубопроводе протяженностью 48 м и сварных соединений получены с помощью НЧ УЗ-контроля по представленной на рис. 25 осциллограмме и приведены в табл. 3. Расстояние до сварных швов и дефектов вычислялось по формуле $L = \frac{vt}{2}$, где t – время прохождения отраженного эхо-сигнала на осциллограмме;



v – скорость распространения НЧ-ультразвука для торсионных волн.

Как видно из табл. 3, точность измерения расстояний вдоль оси трубы для такого интегрального метода достаточно высокая.

Экспериментальные обследования в Крыму открытых участков газопровода Красноперекопского бромзавода (рис. 26, а) (труба диаметром 330 мм, толщина стенки 8 мм) показали потенциальные возможности использования этого метода для обследования участков трубопроводов на расстоянии до 150 м от установленной антенны. Там же проводили обследования подземного участка газопровода, покрытого усиленной противокоррозионной брызольной изоляцией толщиной 9 мм (рис. 26, б). В этом случае акустические волны практически сразу же затухали.

Интегральные исследования по определению возможности выявления коррозионных поражений длинноволновым методом в 2012 г. проводили на складе-полигоне труб ТЭЦ в г. Вишневое. Исследования проводили с использованием достаточно большого количества новых и бывших в употреблении труб с различными видами защитной изоляции.

Было экспериментально подтверждено, что для битумных покрытий дальность акустиче-

ского контроля трубопроводов не превышает 1...3 м и упругие волны достаточно хорошо проходят по трубам с теплоизоляцией, например, подобной пенопласту и гидроизоляции. Данная технология (НЧ УЗК) должна найти широкое применение на многочисленных объектах Украины, России и сопредельных стран. Это многочисленные «вспомогательные», технологические трубопроводы на газо- и нефте-разработках, трубопроводных нефте-, газо-, химических производств; вновь строящиеся газо-, нефтепроводы с большим количеством монтажных кольцевых швов, каждый имеющий свой акустический портрет.

Бурное развитие полупроводниковой техники, цифровых методов обработки изображений стимулировало интенсивное совершенствование и широкое применение на практике термографии. Тепловой метод НК (термические краски, тепловизионное оборудование, полупроводниковые элементы и др. атрибуты) в ИЭС применялись достаточно давно (рис. 27). Это дистанционный и очень эффективный метод НК.

В ИЭС в 2011–2012 гг. была выполнена работа по дефектометрии при термографии. Несмотря на то, что в настоящее время появилось много техники для термографических иссле-

Таблица 3. Сравнительные результаты измерения координат искусственных дефектов

Координаты дефекта	ИД1	1	2	ИД2	3	4	5	6	7	Торец
Рассчитанные по УЗК, м	4,15	6,05	12,12	14,97	18,35	24,48	30,78	36,59	42,88	48,68
Измеренные рулеткой, м	4,25	6,04	12,09	15,25	18,34	24,45	30,56	36,62	42,69	48,69

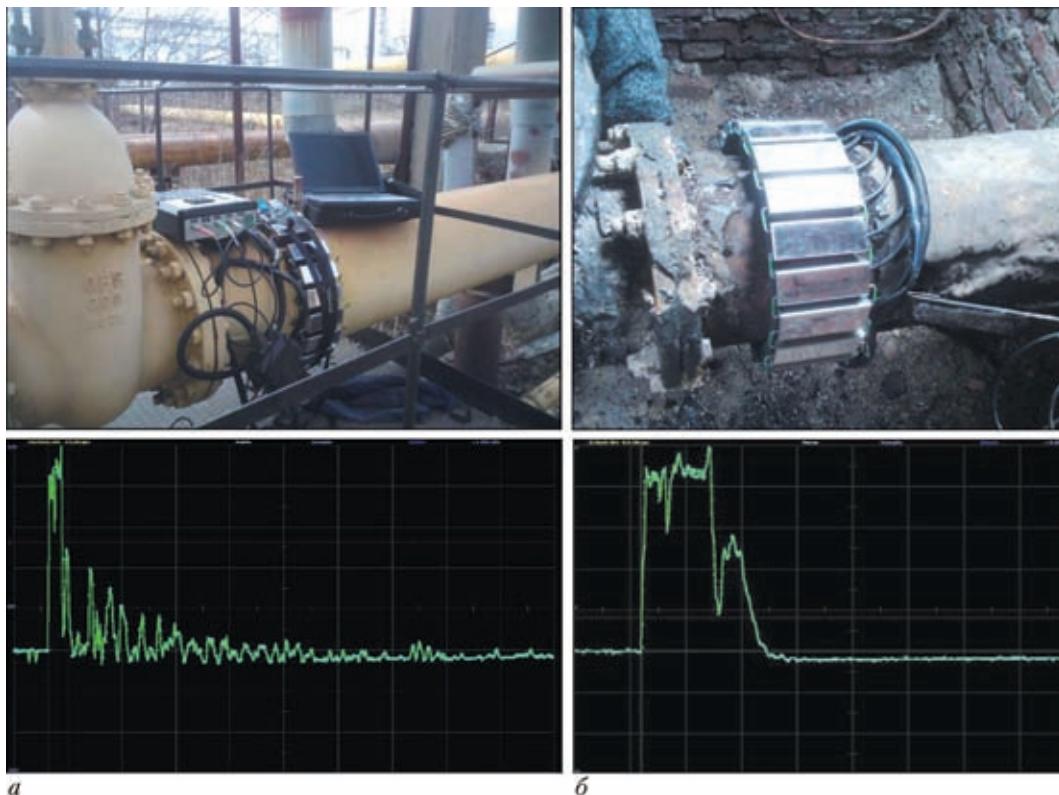


Рис. 26. Обследование открытых (а) и подземных (б) участков Красноперекопского газопровода

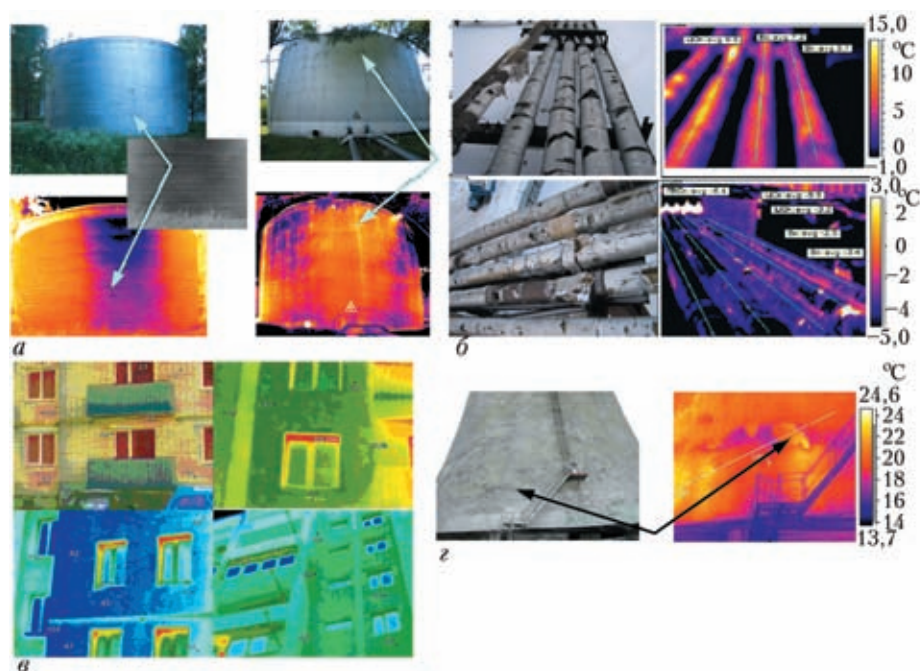


Рис. 27. Термографическое обследование резервуаров (а), трубопроводных магистралей (б), промышленных и гражданских зданий (в), градирен (г) (стрелками обозначены участки с возможными дефектами)

дований, пока нет средств для дистанционных измерений обнаруженных площадей зон потери тепла, глубины поражения. Созданы лазерно-термографические измерительные системы, позволяющие определять дистанционно координаты и геометрические параметры дефектов потенциально опасных потерь тепла. В результате исследований было разработано измерительное лазерно-термографическое устройство и соответствующее ему программное обеспечение для определения координат и геометрических размеров дефектов, обнаруженных при термографии.

Данное программное обеспечение позволяет рассчитать площадь дефекта, который обнаруживается с помощью тепловизионной камеры, представить обнаруженный дефект в графическом виде, а также построить его объемное изображение.

Дефектометрия при термографии – новое важное научное направление, которое должно получить развитие.

Таким образом, в области дефектоскопии в последние годы в ИЭС разработаны методические основы обнаружения дефектов при радиографии и созданы статистические эталоны, повышающие качество расшифровки радиограмм и обнаружение тонких трещиноподобных дефектов с малым раскрытием.

Изучено взаимодействие НЧ-антенны и протяженного объекта контроля. Предложены конструкции антенн и аппаратуры для их возбуждения и обработки НЧ-информации.

Исследован акустический тракт теневого УЗ дефектоскопа с использованием коротко- и длиннофокусных импульсных ЭМА-преобразо-

вателей, что повышает вероятность обнаружения расслоений и коррозионных поражений в сварных листовых конструкциях.

Создана технология тангенциальной рентгенографии и рентгеноскопии для измерения толщины стенки труб, изоляции и внутреннего заполнения без вывода ее из эксплуатации.

Выполнены исследования аномалий собственного магнитного поля объекта при механических напряжениях, что позволило предвидеть возникновение усталостных трещин.

Исследованы возможности магнитооптического метода для выявления тонких дефектов без промежуточного носителя информации о магнитных полях рассеяния в виде никелевой ленты.

Разработана рентгенотелевизионная система на основе ПЗС-матриц и флуоресцирующих экранов, открывающая реальные возможности для многочисленных вспомогательных объектов нефте-, газораспределительных комплексов, которые до сих пор не обеспечены НК.

Внедрены методики оценки размеров внутренних трещиноподобных дефектов, низкотемпературных сероводородных расслоений на основе методов TOFD, SAFT, фазированных решеток при УЗК, например, на ОАО «Лукойл-Карпатнефтехим», на больших мостовых и других металлоконструкциях.

Широко внедряется тепловой метод НК, заложены основы термографической дефектометрии.

Продолжается разработка систем автоматизированного контроля с использованием пьезо- и ЭМА возбуждения УЗ-волн для выявления дефектов типа расслоений в прикромочных зонах



сварного шва и основного металла труб; ведутся разработки автоматизированных систем распознавания образа дефекта в результате УЗ-контроля, что воплощается в новых АУЗК установках.

При ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины работают Межотраслевой учебный центр, Центр сертификации и Аттестационный центр НК, которые готовят специалистов этой профессии по международным стандартам ISO 9712, EN-473 и др. Начало этой деятельности по НК было положено общим приказом Национальной академии наук Украины, Государственного комитета Украины по стандартизации, Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда, который учредил Национальный комитет по неразрушающему контролю (НАК). Позже был создан Технический комитет по стандартизации ТК-78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Практически по всем методам НК в ИЭС выпущены учебные пособия, издается бюллетень «НК-информ», журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

В Украине в 2012 г. издан справочник «Неразрушающий контроль в Украине», в котором представлено реальное положение дел в стране по этому важному научно-техническому направлению, приведены сведения о всех организациях, работающих в этой области, отмечена роль НАН Украины в становлении этого наукоемкого направления.

Следует отметить, что участие в европейских и всемирных конференциях по НК в Копенгаге-

не (7-я ECNDT, 1998 г.), Риме (15-я WCNDT, 2000 г.), Барселоне (8-я EFNDT, 2002 г.), Монреале (16-я WCNDT, 2004 г.), Берлине (9-я EFNDT, 2006 г.), Шанхае (17-я WCNDT, 2008 г.), Москве (10-я EFNDT, 2010 г.), Дурбане (18-я WCNDT, 2012 г.) послужило развитию передовых методов НК в Украине.

Сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона работают в Европейской федерации по НК и Всемирной организации ICNDT, являются членами ТК-135 ISO. Дефектоскописты ИЭС сотрудничают с международными ANDTI, ISO, CEN, IAEA и другими организациями России, Беларуси, Молдовы, Польши, Чехии, Болгарии, Хорватии, Италии, США, Кореи и других стран. Участие в Европейском научном проекте «Мониторинг состояния объектов с помощью дальнедействующего ультразвука (LRUCM), выполняемого по 6-й Рамочной программе ЕС, проекте «Ship Inspector», касающегося создания технических средств для определения зон усталости и предразрушений морских сооружений способствует распространению в Восточной Европе передовых методов НК. Основной целью проекта Ship Inspector является развитие новых технологий для обнаружения дефектов и коррозий в критических зонах кораблей без извлечения их из воды.

Признанием заслуг ИЭС им. Е. О. Патона в области дефектоскопии является регулярное присутствие специалистов из разных стран, желающих повысить свой уровень знаний в НК.

The paper shows the role of E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine as one of the leading scientific organizations, which has made a significant contribution to development and formation of the system of nondestructive testing control in industry. The main PWI developments in the field of ultrasonic, radiation, magnetic and other methods of nondestructive testing of welded joints and metal products are considered, which have been successfully introduced at the enterprises of Ukraine and Russia. The paper presents the results of investigations on development of modern nondestructive testing technologies: TOFD, SAFT, EMA, directed wave ultrasonic inspection, numerical radiography, etc. Activity on harmonizing the European and development of national standards and industry normative documents in the nondestructive testing field is described. Questions of international cooperation in the field of joint research and training of personnel on nondestructive testing in keeping with international standards are briefly discussed.

Keywords : E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU, nondestructive testing of welded joints, developments in the field of NDT, development of national standards

Поступила в редакцию
24.10.2013