

Новые средства НК

Ultrasonic inspection of metals – the state of the art instrumentation

G. Passi

The today's industry requirements applied to the ultrasonic non-destructive testing procedures related to the metallic objects (base metal and welding) are reflected in the article. The recent advances implemented in the state of the art equipment allowing to observe the above requirements are represented.

Современная аппаратура для УЗК металлоконструкций

Дефектоскопия 2003, күнүмдүк саны № 1

43

На протяжении многих лет НК является штатной операцией в энергетике, машиностроении, авиации, нефтехимии, военной промышленности и т.д. Практически неисчерпаемое разнообразие объектов контроля и конструкционных материалов, а также условий эксплуатации стимулирует постоянное совершенствование существующих и разработку новых технологий контроля и технических средств (аппаратура, датчики, приспособления) для их реализации. По данным различных агентств (Frost & Sullivan, Business Communications, Maxtech International),

специализирующихся на исследовании мировой конъюнктуры и рынков в различных сферах бизнеса, мировой объем продаж средств НК достиг двух миллиардов долларов в 2002 г. и ежегодно стабильно увеличивается на 4 – 5 %, даже несмотря на рецессию последних лет в индустриально развитых странах. Объем продаж на рынке услуг по выполнению контроля, будучи в несколько раз больше, также постоянно возрастает.

Наряду с увеличением объема продаж возрастают и требования к технологиям и аппаратуре НК. С учетом целевого увеличения срока службы различных объектов и ресурсосбережения НК перестает быть интересен потребителю лишь как процедура обнаружения внутренних дефектов и неизбежно трансформируется в важную составляющую процесса мониторинга. Сегодня ни для кого не является удивительным требование представлять результаты контроля в формате, пригодном для использования в прочностных расчетах и для наблюдения за развитием уже обнаруженных дефектов, с целью максимально отдалить момент изъятия проблемного объекта из эксплуатации или его ремонта. Вместе с тем качественный скачок в развитии аппаратуры НК, связанный с развитием цифровой электроники, в подавляющем большинстве случаев привел лишь к снижению себестоимости, массогабаритных характеристик, энергопотребления аппаратуры, оснащению ее функциями автоматических измерений, а также запоминания настроек и одиночных сигналов. Поэтому, как и десятилетия назад, контроль в процессе эксплуатации выполняется оператором, вручную манипулирующим

датчиком на поверхности объекта и одновременно анализирующим и интерпретирующим сигналы, воспроизводимые прибором, который на месте принимает решение о дефектности или годности контролируемого объекта.

1. Объективизация результатов контроля

Основные требования, которым должна удовлетворять процедура НК для того, чтобы обеспечить применимость его результатов для мониторинга объектов, таковы [1–4]:

- гарантированное выполнение контроля в полном объеме;
- автоматическая регистрация и обработка сигналов;
- визуализация результатов контроля, то есть представление их в наглядном виде, доступном для восприятия техническим персоналом и экспертами, не разбирающимися в сигналах, присущих реализованному методу контроля; четкое отображение местоположения и других характеристик дефектного участка;
- возможность проведения ретроактивных измерений дефектных участков без повторного сканирования объекта контроля (режим off-line);
- возможность наложения результатов контроля, полученных для одного и того же дефектного участка, через определенный временной интервал;
- воспроизведение легко интерпретируемого документа контроля.

Выполнение перечисленных требований обеспечивает объективность результатов НК, сводя к минимуму влияние

Об авторе



Пасси Гарри Соломонович

Генеральный директор и научный руководитель фирмы Sonotron NDT (Израиль), д-р наук, профессор, III уровень в пяти дисциплинах НК (UT, ET, MPI, MIA, RT)

человеческого фактора. Однако одного выполнения этих требований недостаточно ввиду того, что новая аппаратура, очевидно необходимая для реализации усовершенствованной процедуры контроля, должна быть позитивно воспринята операторами (портативность, простота и быстрота настройки, простота и удобство управления в процессе контроля и при ретроактивном анализе его результатов), организациями, выполняющими контроль (стоимость капитализации и содержания, надежность, универсальность/мультизадачность, производительность), потребителями результатов контроля (производительность и стоимость контроля, повторяемость результатов, соответствие специфическим требованиям, связанным с особенностями контролируемого объекта, например, исключение возможности повреждения объекта контроля средствами сканирования).

В результате так и не нашли широкого применения многочисленные образцы, основанные на применении механических сканеров, а также аппаратура, представляющая собой приставки к обычным дефектоскопам и предполагающая одновременное использование двух или более электронных блоков одновременно. Также, в общем негативно, рынок воспринял моноблочные образцы, созданные путем интеграции дефектоскопа и дополнительных средств регистрации на шасси Iar-top компьютера, – в данном случае сдерживающими факторами являются высокая стоимость самого базового компьютера и эргономические проблемы, связанные с его размещением и управлением на объекте контроля.

С целью преодоления барьера между актуальной потребностью в объективизации результатов контроля и внедрением соответствующей аппаратуры, не нашедшей широкого практического применения, в Sonotron NDT разработана новая концепция, на основе которой выпускается ряд приборов. Базовой моделью ряда является портативный моноблочный прибор ISONIC 2001, в котором вместо обычного микропроцессора с ограниченными возможностями интегрирован полнофункциональный компьютер P-MMX-S – 300 МГц с оперативной памятью RAM-128М, жестким диском емкостью не менее 10 Гб и активным сенсорным жидкокристаллическим SVGA экраном с высокой яркостью (sun-readable) и цветовым разрешением (high color). Таким образом, впервые прибор НК, использующий полнофункциональный компьютер, скомпонован в привычном для оператора виде при работе в полевых условиях, а не на Iar-top шасси.

В зависимости от электронной платы дефектоскопа, интегрированной в ISONIC 2001, прибор реализует ультразвуковой, вихретоковый или импедансный методы контроля. Он оснащен электронными устройствами и сенсорами, обеспечивающими непрерывное слежение за координатами и ориентацией преобразователя, вручную перемещаемого

Рис. 1. Акустическая локация: 1, 2 – соответственно излучатель и приемники ультразвуковых волн; 3 – объект контроля

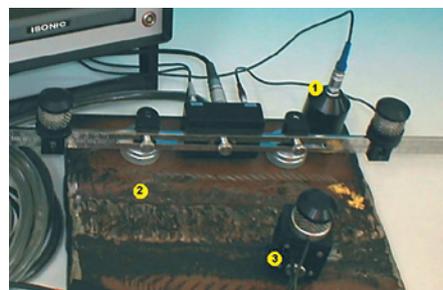


Рис. 2. Слежение за состоянием акустического контакта: 1 – излучатель опорного сигнала; 2 – объект контроля; 3 – ПЭП

по поверхности объекта контроля (акустическая локация), а также за контактом преобразователя с объектом. При этом какая-либо механическая связь между преобразователем и прибором отсутствует. Важно, что в ISONIC 2001 используются общеизвестные физические принципы дефектоскопии (благодаря этому прибор удовлетворяет требованиям общепринятых стандартов на контроль различных объектов и совместим с соответствующими преобразователями), но наиболее сложная функция регистрации, обработки и интерпретации принимаемых сигналов передана от оператора бортовому компьютеру, который одновременно обеспечивает визуализацию результатов контроля, их запоминание, хранение и объективное представление [5 – 12].

При акустической локации (рис. 1) ультразвуковые сигналы в воздух от излучателя 1, расположенного на датчике, которым ведется контроль, улавливаются приемниками 2, которые располагаются либо на объекте контроля 3, либо рядом

с ним. Важной особенностью системы акустической локации прибора ISONIC 2001 является ее перестраиваемость, позволяющая сканировать участки различных размеров и кривизны, обеспечивая перекрытие одной и более зон сканирования без переустановки приемников (например, при контроле стыковых сварных швов, когда необходимо сканирование с обеих сторон шва). Еще один существенный фактор – устойчивость к воздействию ветра, производственного шума – опорного сигнала до 60 дБ и т.п. Дискретность отсчета координат преобразователя составляет 0,25 и 1 мм при сканировании участков размером соответственно до 200×200 и до 2000×3000 мм, а дискретность отсчета угла разворота преобразователя – 0,5 и 1° при сканировании участков до 200×200 и 500×500 мм; минимальный радиус кривизны сканируемых объектов 25 мм.

Слежение за состоянием акустического контакта (рис. 2) осуществляется с помощью излучателя 1 низкочастотного ультразвукового шума – опорного сигнала (диапазон 10 – 200 кГц), который устанавливается на объекте контроля вблизи зоны сканирования. Мощность излучения выбирается таким образом, чтобы обеспечить «насыщение» объекта контроля 2 так, чтобы уровень опорного сигнала во всех точках на поверхности объекта был одинаковым. Прием опорного сигнала осуществляется тем же преобразователем 3, которым ведется контроль. Опорный сигнал оценивается специальным каналом прибора, и по его уровню определяется состояние акустического контакта. При кажущейся простоте реализации данного способа следует учесть [11, 13, 14]:

- схемотехника генератора шума должна обеспечивать абсолютную линейность усиления всех частотных составляющих шумового опорного сигнала;
- мощность излучения шума должна регулироваться в диапазоне не менее 40 дБ.

Только в этом случае удастся избежать «провалов» при распространении опорного сигнала в объекте контроля и достигнуть точности оценки акустического контакта 0,5 дБ независимо от типа используемого стандартного ультразвукового преобразователя как оснащенного, так и не оснащенного согласующим индуктором. В приборе ISONIC 2001 указанная точность достигается при диапазоне перестройки мощности излучения опорного сигнала 64 дБ и максимальной скорости сканирования 150 мм/с. Процедура настройки на объекте контроля при этом является предельно простой [7, 9, 11, 13, 14].

Высокая точность оценки изменений акустического контакта позволяет ввести соответствующую обратную связь, обеспечивающую коррекцию усиления прибора в процессе сканирования

При работе с программным пакетом оператор вводит в прибор значения размеров объекта и параметров контроля, после чего осуществляет «привязку» системы координат к объекту и начина-

ет сканирование. В процессе сканирования ISONIC 2001 формирует одну или несколько трехмерных матриц данных, где накапливаются текущие координаты преобразователя и соответствующие им оцифрованные сигналы датчика, а также сигналы о состоянии контакта между датчиком и объектом. Параллельно в реальном времени обеспечивается обработка сигналов и воспроизводится изображение объекта, которое динамически обновляется в процессе сканирования и накопления информации.

В зависимости от реализуемой технологии контроля изображение объекта формируется в результате **сплошного** или **дискретного** сканирования.

Сплошное сканирование реализуется через «построчное» (с заданным шагом) движение датчика по поверхности объекта контроля. Этот вид сканирования наиболее распространен и применяется при УЗК с использованием наклонных или прямых ПЭП с целью обнаружения дефектов в сварных швах, основном металле, продуктах литья и поковках, а также в неметаллических материалах, например, в композитных многослойных структурах, покрытиях и т. п. Также он используется для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов вихретоковым методом и при контроле сотовых структур импедансным методом. При сплошном сканировании

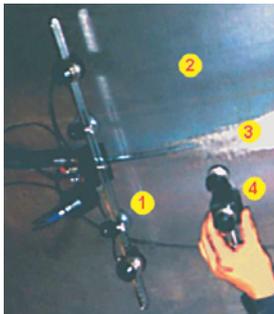
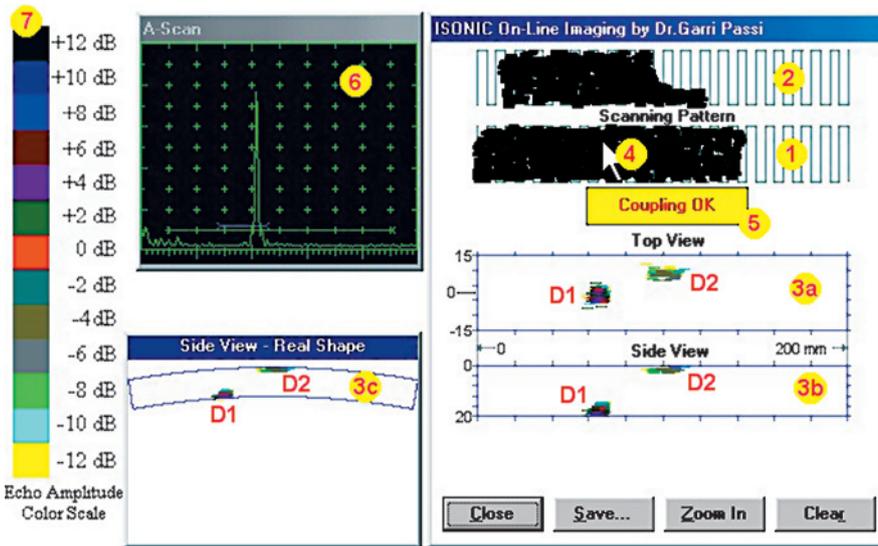


Рис. 3. Пример контроля стыкового шва трубы (сплошное сканирование) и соответствующего изображения на экране ISONIC: 1, 2 – зоны и план сканирования с обеих сторон шва 3 (зачерненные участки соответствуют уже просканированным областям); D1 и D2 – выявленные дефекты, отображенные в плане (3a), в развернутом (3b) и в реальном (3c) видах продольного сечения; 4 – текущая позиция датчика на объекте контроля; 5 – индикатор текущего состояния акустического контакта; 6 – текущее отображение сигналов, воспринимаемых датчиком; 7 – цветовая шкала амплитуд эхо-сигналов

– так называемый «квазиидеальный контакт» [12]. Данный режим работы предусмотрен в приборе, однако, его использование не является безусловным, так как изменение усиления в процессе сканирования не допускается базовыми стандартами на УЗК [2–4, 15–17]. Поэтому активизация такого режима должна быть *предопределена* и *разрешена* техническими условиями на выполнение контроля того или иного объекта.

2. Примеры контроля металлических объектов

Важнейшим компонентом ISONIC 2001 является программное обеспечение. На сегодняшний день прибор может быть укомплектован более чем 40 программными пакетами. Все пакеты имеют «интуитивный» графический пользовательский интерфейс, оптимизированный для использования в полевых условиях персоналом без специальной подготовки для работы с компьютерами. **Каждый пакет реализует самостоятельную технологию контроля для класса сходных объектов, которые могут отличаться друг от друга размерами и материалом.**

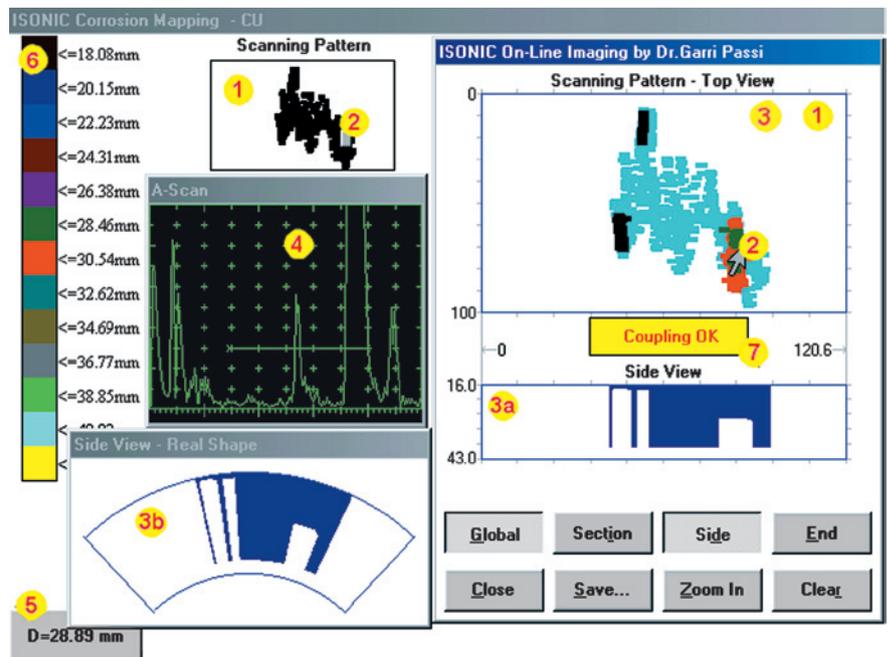


Рис. 4. Пример изображения на экране ISONIC при картографии коррозии участка трубы (сплошное сканирование): 1 – зона сканирования (зачерненные участки соответствуют уже просканированным областям); 2 – текущая позиция датчика; 3 – карта коррозии участка трубы и его сечение в развернутом (3a) и в реальном (3b) видах; 4 – текущее отображение сигналов, воспринимаемых датчиком; 5 – текущее значение толщины стенки трубы под датчиком; 6 – цветовая шкала толщин; 7 – индикатор текущего состояния акустического контакта

обнаруживаются дефекты, находящиеся непосредственно под датчиком или на небольшом, до нескольких сантиметров, расстоянии от него.

Дискретное сканирование применимо для ультразвуковых волн, позволяющих обнаруживать дефекты в широком диапазоне расстояний (от нескольких сантиметров до нескольких метров) от датчика. Такие волны возможно возбудить в объекте, имеющем соответствующую геометрию, например, в листах, стенках труб и резервуаров, стержнях, ободах и т. п. Таким образом осуществляется высокопроизводительный контроль объектов, при котором область манипуляции датчиком на поверхности объекта во много раз меньше области контроля. Во многих случаях контроль с использованием дискретного сканирования обеспечивает обнаружение дефектов в недоступных или ограниченно доступных местах, например, в днище наземного резервуара, в стенке подземного резервуара, в стенках труб непосредственно над бетонными подпорками, в деталях авиационных двигателей и т. п.

2.1. Контроль сварных швов

Программные пакеты УЗК сварки применимы для стыковых швов листов, труб и сосудов различных диаметров (от 50 мм), а также угловых, тавровых, нахлесточных и других соединений, обеспечивая контроль эхо-методом наклонными совмещенными или раздельно совмещенными ПЭП на поперечных или продольных волнах с визуализацией дефектов в плане и в продольном и поперечном сечениях шва. После выполнения сканирования возможен послойный анализ изображений в трех плоскостях (рис. 3). Помимо эхо-метода обеспечивается прозвучивание шва парой наклонных ПЭП, работающих на продольных волнах, заминание и обработка сигналов и изображений в соответствии с технологией TOFD. Дополнительно к контролю металла шва при необходимости по выбору оператора реализуется также контроль зоны термического влияния [7, 9, 10, 13, 18 – 21].

2.2. Картография коррозии (толщины стенки)

Этот вид контроля широко применяется для различных панелей и труб в энергетике, нефтяной и газовой отраслях, корпусов судов, а также обшивок несущих поверхностей в авиации. Он реализуется за счет использования прямых совмещенных и раздельно-совмещенных ПЭП и обеспечивает отображение карты коррозии с цветовым кодированием толщины (от 2 до 2³² градаций) и сечений

контролируемого участка. Как во время сканирования, так и по его завершению возможен послойный анализ изображений в трех плоскостях. Важно, что разрешающая способность при создании карты толщин не зависит от выбранного количества цветов для ее отображения – варьирование количеством цветов и, соответственно, разрешающей способностью карты возможно после завершения

путем дискретного сканирования. При этом используются специализированные датчики, обеспечивающие генерацию и прием ультразвуковых волн, распространяющихся в объекте на большие расстояния, а степень коррозионного повреждения определяется амплитудами сигналов от него [7, 9]. В примере на рис. 5 опорная плита 1 днища резервуара имеет выступ шириной 5 – 10 см за

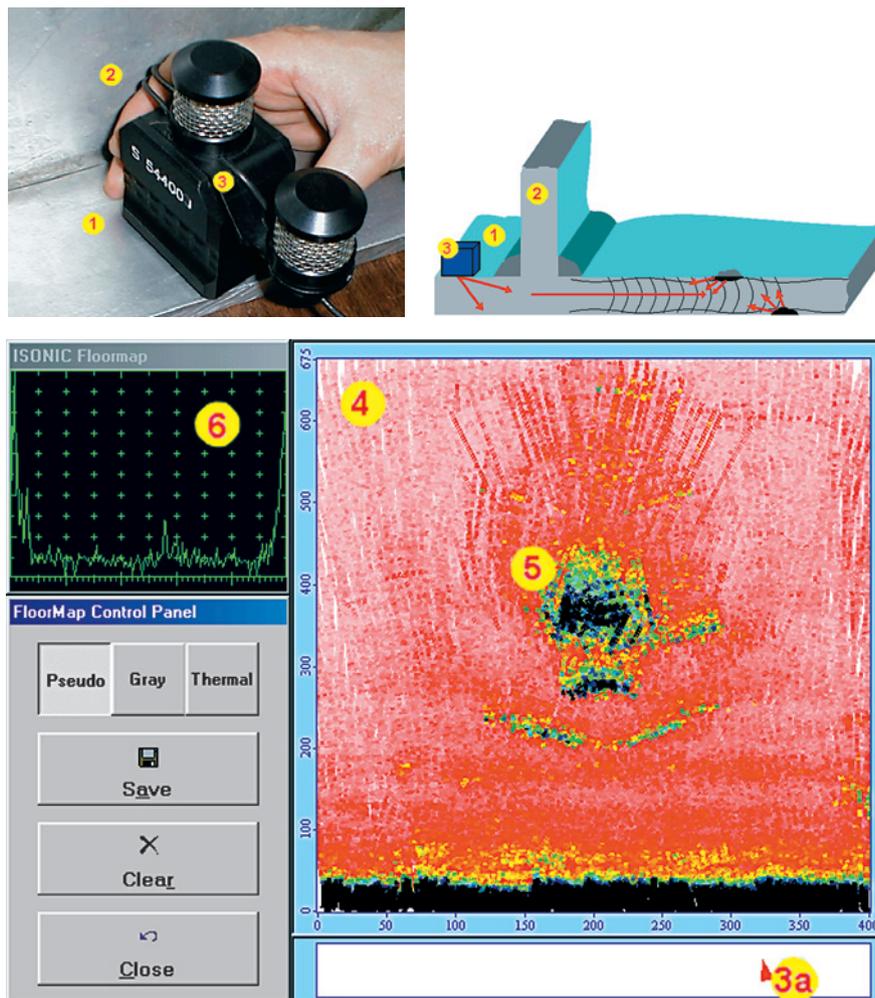


Рис. 5. Пример контроля опорной плиты днища резервуара (дискретное сканирование) и соответствующего изображения на экране ISONIC: 1 – опорная плита днища резервуара; 2 – внешняя стенка; 3 – датчик; 3а – маркер; 4 – карта коррозионных повреждений; 6 – окно отображения сигналов

сканирования, если требуется провести более детальный анализ. Это обеспечивается тем, что прибор запоминает и сохраняет не изображение, а всю матрицу данных, из которой карта коррозии может быть в любой момент воспроизведена с различным разрешением [5, 7, 9, 10]. На рис. 1 приведен пример картографии коррозии участка трубы (сплошное сканирование), а на рис. 4 – соответствующее изображение на экране прибора.

Когда поверхность объекта контроля недоступна или труднодоступна, проблема обнаружения и картографии коррозионных повреждений может быть решена

его внешнюю стенку 2, вдоль которой в дискретных точках последовательно размещается датчик 3, обеспечивающий прозвучивание в направлении внутрь резервуара на всю ширину опорной плиты (до 1,5 м). В каждой точке установки датчика обеспечивается его вращательное движение, перекрывающее соответствующий сектор опорной плиты. Текущее положение и разворот датчика отображаются маркером 3а. В результате формируется карта коррозионных повреждений опорной плиты путем обработки сигналов, каждый из которых отображается в соответствующем окне 6 и запоминается.

2.3. Контроль покрытий

Эта задача типична для химической промышленности, а также для ряда конструкций и соединений, используемых в аэрокосмической отрасли. Обычно защитные покрытия располагаются внутри резервуаров, труб, топливных баков и т. п., где находятся агрессивные жид-

2.4. Эспресс-визуализация сечений контролируемых объектов

Нередко объект контроля имеет относительно небольшие размеры, а доступ к нему ограничен, например, в энергетике, где широко применяются сварные конструкции, объединяющие множество

изображениями дефектов динамически изменяющихся эхо-сигналов, а не их огибающих, уже предусмотрено рядом стандартов, регламентирующих оценку выявленных дефектов [23, 24].

3. Документирование результатов контроля

Приборы серии ISONIC 2001 сохраняют все результаты контроля и настройки на встроенном жестком диске большой емкости (не менее 10 Гб), что делает их запоминающую способность практически неограниченной, особенно с учетом компрессии, применяемой автоматически при создании файлов. Вся информация, накопленная в процессе контроля, может быть выведена на любой принтер, подключаемый непосредственно к прибору, или через локальную компьютерную сеть. Документ контроля, автоматически генерируемый прибором, содержит не только графическую информацию, но и данные о настройке прибора, объекте контроля и т. п. Файлы с результатами контроля могут быть преобразованы в общепринятые форматы doc, xls, pdf и в дальнейшем перенесены на любой компьютер, оснащенный лишь стандартным программным обеспечением.

Приборы серии ISONIC 2001 также поддерживает IP протокол, при котором сигналы и изображения непосредственно в процессе контроля в реальном времени передаются в компьютер, где могут обрабатываться и храниться независимо от оператора [7, 9, 25, 26].

Выводы

1. Объективизация результатов контроля, обеспечиваемая путем независимой от оператора регистрации соблюдения плана сканирования и качества контакта, а также всех принимаемых сигналов с последующим формированием двух- и трехмерных изображений различных типов, превращает НК из процедуры обнаружения дефектов в основополагающую ступень мониторинга объектов в процессе эксплуатации

2. Средство регистрации, позитивно воспринятое практиками, представляет собой **портативный моноблочный дефектоскоп с полнофункциональным бортовым компьютером и средствами определения положения ПЭП и контроля акустического контакта.**

3. В связи с преобладанием в подавляющем большинстве практических случаев ручного сканирования, наиболее приемлемым является немеханическая связь преобразователя с прибором, которая обеспечивается, например, посредством техники акустической локации. При

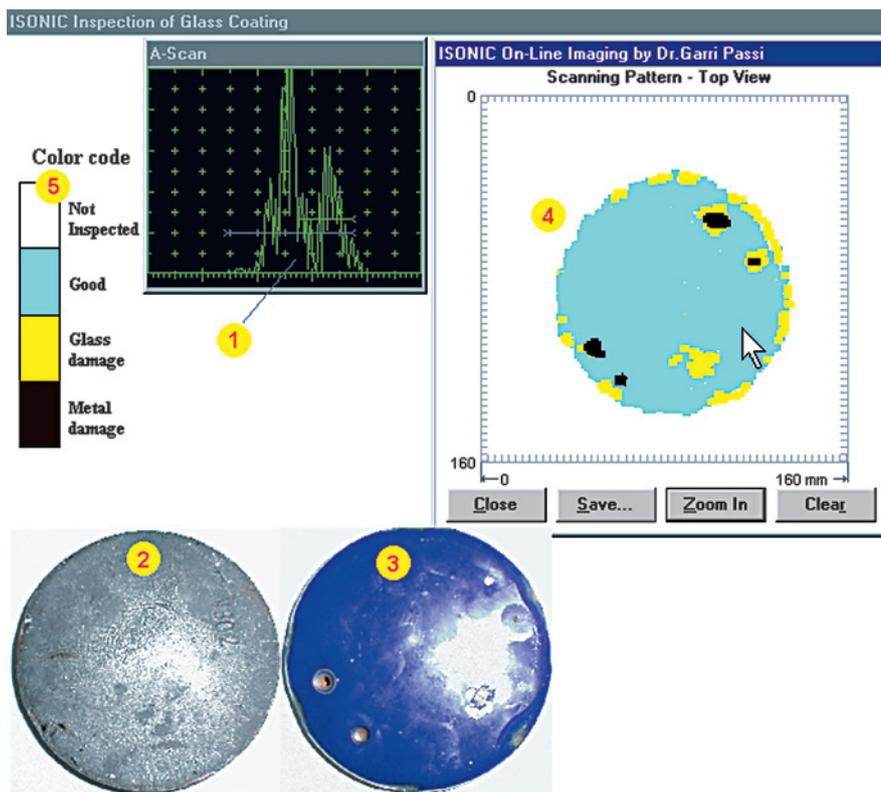


Рис. 6. Пример контроля стеклянного покрытия на металлическом образце: 1 – сигнал, обрабатываемый прибором; 2 – поверхность сканирования; 3 – зеркальное изображение стороны образца с покрытием с искусственными и естественными дефектами; 4 – карта состояния покрытия; 5 – цветовая шкала кодирования карты покрытия

кости. Сканирование объектов ведется с наружной стороны, причем традиционные для обычного УЗК критерии оценки, основанные на измерении амплитуд и временных сдвигов сигналов, как правило, не применимы. Для определения состояния покрытия следует оценивать тонкую структуру сигнала, для чего используется, например, спектральный анализ, поэтому данная задача (рис. 6) может быть решена только в приборах класса ISONIC, оснащенных полнофункциональным бортовым компьютером.

Следует отметить, что не существует единого критерия оценки качества покрытия по характеристикам принимаемых сигналов, поэтому модуль обработки сигналов для каждого конкретного сочетания основного материала и покрытия создается отдельно на основании серии экспериментов и затем «подхватывается» основным программным пакетом [22].

небольших труб, входящих/выходящих из котла на ограниченной площади поверхности. В таких случаях невозможно применять устройства определения местоположения преобразователя на объекте и трехмерный протокол визуализации, однако, возможна визуализация отдельных сечений объекта, обеспечивающая получение двухмерных B-Scan изображений с учетом угла ввода ультразвукового луча и количества отражений от стенок объекта. Важно, что при этом сохраняется вся последовательность полученных при сканировании сигналов (A-Scan), и эта последовательность может быть многократно динамически «прокручена» ретроактивно с привязкой к зарегистрированному изображению сечения объекта с дефектами. Данная технология, получившая название ABIScan (рис. 7), является одним из стандартных режимов работы приборов серии ISONIC [6, 7]. Следует отметить, что запоминание вместе с

этом размеры области сканирования в один прием и план сканирования должны оставаться такими же, как и при традиционном ручном контроле.

4. Техника контроля контакта между преобразователем и объектом контроля должна быть совместима с преобразователями любого типа.

5. В случае невозможности применения средств определения положения

пакетов. Это значительно повышает коэффициент использования, а, следовательно, и окупаемость прибора.

Литература

1. Use of ultrasonic examination in lieu of radiography. – ASME Case 2235-4, Approval date. Nov 30, 2001.

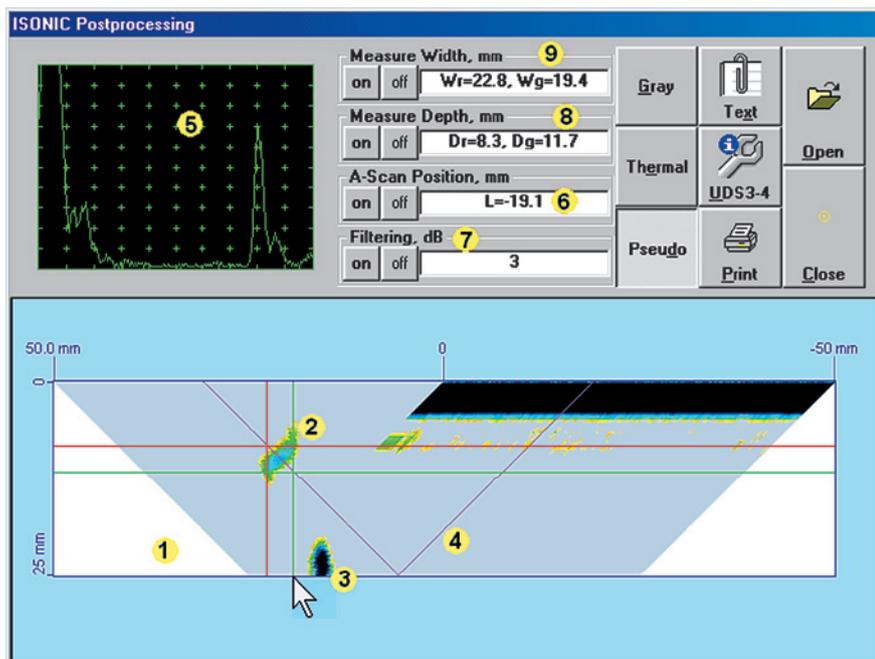


Рис. 7. Пример экспресс-визуализации с использованием технологии ABIScan – контроль наклонным ПЭП прямым и однократно отраженным лучом: 1 – B-Scan изображение; 2, 3 – изображения дефектов; 4 – ход луча в объекте контроля, обеспечивающий получение максимального эхо-сигнала от дефекта 2; 5 – A-Scan, содержащий максимальный эхо-сигнал от дефекта 2, воспринимаемый при расположении точки выхода луча в позиции 6; 7 – уровень отсечки при воспроизведении B-Scan изображения; 8, 9 – проекционные размеры дефекта 2 (условные высота и ширина)

ПЭП, перемещаемого вручную, например, при ограниченном доступе к объекту, следует применять технику экспресс-визуализации отдельных сечений контролируемого объекта с сохранением последовательности всех сигналов, воспринимаемых преобразователем; при построении изображения необходимо учитывать угол ввода и ход луча в объекте контроля.

6. Документ контроля, создаваемый прибором, должен быть воспроизводимым с использованием обычного компьютера, оснащенного лишь стандартным пакетом программ.

7. Очевидно, что приборы, обеспечивающие объективное представление результатов контроля, превосходят в цене обычные ультразвуковые дефектоскопы. В связи с этим экономически целесообразна мультизадачная архитектура прибора, обеспечивающая контроль различных объектов за счет соответствующих легко устанавливаемых программных

2. Ultrasonic examination methods for welds. – ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Sect. VIII. Article 4. Aug 2002.

3. Non-destructive testing. – Characterization and verification of ultrasonic examination equipment. Part 3: Combined equipment. – British and European Standard BS EN 12668-3. 2000.

4. Non-destructive examination of welded joints. – Ultrasonic examination of welded joints. – British and European Standard BS EN 1714. 1998.

5. Moshkovich V., Passi A., Passi G., Safin R. Recent advances in the ultrasonic inspection recording and reporting – instrumentation: Part 2. Straight beam inspection and imaging. – The e-Journal of Nondestructive Testing. 2003. V. 8, No. 11 / <http://www.ndt.net/article/v08n11/passi2/passi2.htm>

6. Moshkovich V., Passi A., Passi G. Recent advances in the ultrasonic inspection recording and reporting – instrumentation: Part 1. Simplified rapid imaging of the separate sections of the test objects – classification of the B-scans. – Ibid. No. 9 / <http://www.ndt.net/article/v08n09/passi/passi.htm>

7. Passi G. ISONIC workstation from Sonotron NDT/Operating Manual/Revision 7.00 – Rehovot (Israel): Sonotron NDT, 2003. – 471 p./<http://www.sonotronndt.com/pdf/opman70.pdf>

8. Passi A., Passi G., Eitan A. Method of displaying a stream of digital data on a display area of a predetermined size/ US Pat. 6545681, publ. Apr. 8, 2003.

9. Passi G. ISONIC workstation from Sonotron NDT/Operating Manual/Revision 6.00 – Rehovot (Israel): Sonotron NDT, 2002. – 392 p./<http://www.sonotronndt.com/pdf/opman60.pdf>

10. Kritsky M., Moshkovich V., Passi A. et al. Portable workstation for ultrasonic weld inspection. – In: 15th World Conference on Non Destructive Testing/Book of Abstracts. – Rome, 2000, p. 485 (полный текст доклада см. 15th WCNDT CD ROM или <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn695/idn695.htm>)

11. Passi G. Ultrasonic imaging system. – US Pat. 5952577, publ. Sep. 14, 1999.

12. Passi G. Ultrasound imaging system. – US Pat. 5524627, publ. June 11, 1996.

13. Passi G., Kritsky M., Shoef Y. High-reliability manual ultrasonic inspection. – Insight. 1999. V. 41. No. 4. P. 217, 225–231.

14. Passi G., Kritsky M., Shoef Y. High-reliability manual ultrasonic inspection. – The e-Journal of Nondestructive Testing. 1998. V. 3. No. 12/ <http://www.ndt.net/article/ecndt98/ut/471/471.htm>

15. Non-destructive testing. – Ultrasonic examination. Part 2: Sensitivity and range setting. – British and European Standard BS EN 583-2. 2001.

16. Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD). Technique for the detection, location and sizing of flaws. – British Standard BS 7706.1993.

17. Manufacture and testing of pressure vessels. Non-destructive testing of welded joints/ Minimum requirement for non-destructive testing methods. Appendix 1// AD-Merkblatt HP5/3 (Germany). July 1989.

18. Shoef Y., Shoef G., Passi G., Segal I. Evaluation of type and dimensions of discontinuities through three dimensional ultrasonic imaging. – In: 15th World Conference on Non Destructive Testing/Book of Abstracts. Rome, 2000, p. 230 (полный текст доклада см. 15th WCNDT CD ROM или <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn822/idn822.htm>)

19. Berke M., Kleinert W.-D., Reinersmann J. et al. New way for utilizing DGS technology. – Ibid. P. 499. (полный текст доклада см. 15th WCNDT CD ROM или <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn693/idn693.htm>)

20. Passi G. New defect recording system. – Insight. 1996. V. 38. No. 4. P. 260.

21. Passi G., Kritsky M., Shoef Y. Reducing the influence of human factors on the reliability of manual ultrasonic weld inspection. – Insight. 1995. V. 37. No. 10. P. 788–791.

22. Golden A., Moshkovich V., Passi A. et al. Ultrasonic inspection and mapping of internal glass coating in reservoirs and reactors. – In: 15th World Conference on Non Destructive Testing/Book of Abstracts. Rome, 2000, p. 279 (полный текст доклада см. 15th WCNDT CD ROM или <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn691/idn691.htm>)

23. Non-destructive testing. – Ultrasonic examination. Part 5: Characterization and sizing of discontinuities. – British and European Standard BS EN 583-5. 2001.

24. Non-destructive examination of welds. – Ultrasonic examination. – Characterization of indications in welds. – British and European Standard BS EN 1713.1998.

25. Passi A., Passi G. Method and apparatus for ultrasonic data acquisition and transfer in real-time. – Internat. Appl. Publ. under PCT/ #W00238030. May 16, 2002. – 33 p.

26. McLaughlin K., Passi G. Inspection by e-mail: a dream of the future? – Insight. 2000. V. 42. No. 8. P. 494.

Статья получена 12 ноября 2003 г.