



НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ СЛОИСТО-ВОДОРОДНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е. А. ДАВЫДОВ, В. П. ДЯДИН, В. В. КУЗЬМИН

Рассмотрены характерные особенности слоисто-водородного растрескивания корпусов нефтехимического оборудования, изготовленного из низколегированных сталей. Представлены некоторые результаты практических случаев повреждений, полученных на базе компьютеризированных систем. Показана возможность решения проблемы достоверного мониторинга ответственного оборудования, работающего в водородсодержащих средах.

The paper deals with the features of damage, induced by laminated-hydrogen cracking in the cases of petrochemical equipment, made of low-alloyed steels. Some results on practical cases of damage are presented, derived using computerized systems. A possibility is demonstrated of solving the problem of valid monitoring of the critical equipment, operating in hydrogen-containing media.

За последние десять лет в Украине наблюдается тенденция к увеличению случаев слоистого сероводородного и водородного растрескивания нефтехимического оборудования, изготовленного из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Значительное число такого рода повреждений приходится на оборудование, находящееся в эксплуатации более двадцати лет, т. е. отработавшее нормативный срок службы; отмечаются и случаи водородно-слоистого растрескивания на практически новых аппаратах. Последнее связано с тем, что на отечественных нефтеперерабатывающих заводах за последние годы участились случаи переработки нефти с повышенным содержанием сернистых соединений без их предварительной очистки, значительно возросли и простои оборудования. В связи с этим в нефтеперерабатывающей отрасли довольно остро стоит вопрос обеспечения надежной эксплуатации и своевременной замены поврежденного оборудования, что требует внедрения надежных систем технического диагностирования с целью определения оптимальных безопасных сроков эксплуатации. Как уже отмечалось ранее [1], при техническом диагностировании аппаратов, имеющих такого рода повреждения, существующие отечественные нормативы не устанавливают порядок оценки их состояния и условий дальнейшей эксплуатации. Данная задача решалась в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в рамках темы «Разработка методов определения влияния водородно-слоистых и других характерных эксплуатационных дефектов на прочность и работоспособность сварных конструкций в нефтехимической и энергетической областях промышленности». В рамках данной тематики, помимо фундаментальных исследований, направленных на создание расчетных методов оценки критических состояний конструкций, имеющих эксплуатационные повреждения типа «пузырей», совместно с диагностическим предприятием «ТЕСТ» (г. Киев) были выполнены практические обследования аппаратов в нефтеперерабатывающей промышленности, подтвержденных слоисто-сероводородному и водородному растрескиванию. Анализ их резуль-

татов позволил выделить наиболее характерные случаи таких повреждений, определить оптимальные методы неразрушающего контроля (НК) и в ряде случаев дать конкретные технологические рекомендации по продлению сроков службы аппаратов давления (теплообменники, колонны, сепараторы и др.). Некоторые типичные случаи таких повреждений, выявленные в процессе практических обследований как визуальным, так и инструментальными методами разрушающего и НК, предлагаются к рассмотрению в данной статье.

В результате многолетнего обследования оборудования, эксплуатировавшегося в достаточно широком технологическом диапазоне (по температуре, давлению, агрессивности среды, содержанию H_2 , H_2S и др.), накопилось достаточно большое количество случаев слоисто-водородных и сероводородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из малоуглеродистых и низколегированных сталей. На рис. 1 приведена гистограмма процентного распределения повреждений корпусов аппаратов из различных сталей относительно общего количества исследованных случаев. Разумеется, существует определенная условность в приведенных количественных оценках, поскольку при их расчете не учитывались индивидуальные особенности изготовления и условия работы каждого отдельного аппарата. Однако, учитывая большое количество статистических данных, полученных в течение десяти лет на разных производствах, по

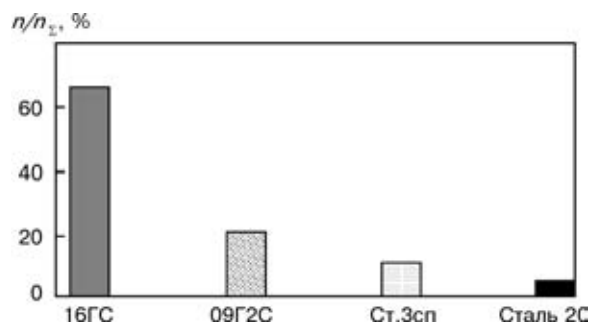


Рис. 1. Отношение количества обнаруженных n к общему количеству n_{Σ} случаев слоисто-водородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из низколегированных и низкоуглеродистых сталей, в диапазоне толщин 12...48 мм

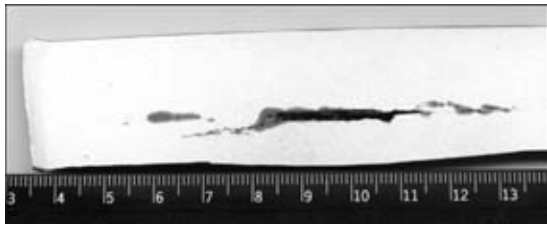


Рис. 2. Пластическое деформирования стенки под действием внутреннего давления в полости

крайней мере, качественно эта зависимость хорошо отражает реальное положение дел. Так, наиболее подвержены слоисто-водородному и сероводородному растрескиванию по результатам практических обследований металлоконструкции, изготовленные из сталей 16ГС и 09Г2С, в отличие от аппаратов, изготовленных из сталей 20, 20К и Ст.Зсп. Различие в степени повреждаемости в основном связано с особенностями структурной текстуры металлопроката [2] и диффузионными процессами, протекающими по границам залегания неметаллических включений [3, 4].

В данном случае существенное значение имеют степень обжатия листа и температура конца прокатки, а также наличие нормализации и распределение примесей (неметаллических включений) по его толщине. Возникающая структурная текстура и соответствующая анизотропия характеристик трещиностойкости и пластичности определяют направление и характер развития разрушения.

Для металлопроката с резко выраженной зональной сегрегацией (как правило, залегающей на глубинах, равных половине или трети толщины листа) слоистые растрескивания развиваются в зоне, характеризующейся значительной анизотропией прочностных свойств в направлении толщины.

Для таких сталей данный тип повреждений может отличаться по своей скорости развития в плоскости листа, носить ступенчатый (при относительно большой толщине слоя зональной сегрегации) или плоскостной характер. В дальнейшем по мере накопления повреждений может наблюдаться деформирование более тонкой стенки под действием внутреннего давления, возникающего за счет накопления в полостях молизированного газа, и разгерметизация наиболее нагруженных участков (рис. 2.). Для металлопроката с повышенным содержанием серы и более равномерным распределением сульфидных включений по толщине листа слоистые растрескивания в большинстве своем носят ступенчатый характер.

Разнообразие и характер слоистых растрескиваний приводят к значительным трудностям при диагностировании технического состояния оборудования, подверженного такого рода повреждениям. В первую очередь это связано как со сложностью определения скорости развития данного процесса в плоскости листа и в направлении его толщины, так и с умением отличить слоистое растрескивание от скоплений обычных неметаллических включений. Во вторую — со сложностью оценки напряженно-деформированного состояния поврежденных зон с учетом изменяющегося давления в полостях.

Рассмотрим наиболее типичные случаи повреждений водородным и сероводородным слоистым растрескиванием аппаратов, изготовленных из низколегированных сталей 16ГС, 09Г2С и малоуглеродистой стали Ст.Зсп.5. С целью выявления характерных отличий в слоистых повреждениях указанных марок сталей были отобраны газовые абсорберы, изготовленные из данных материалов и

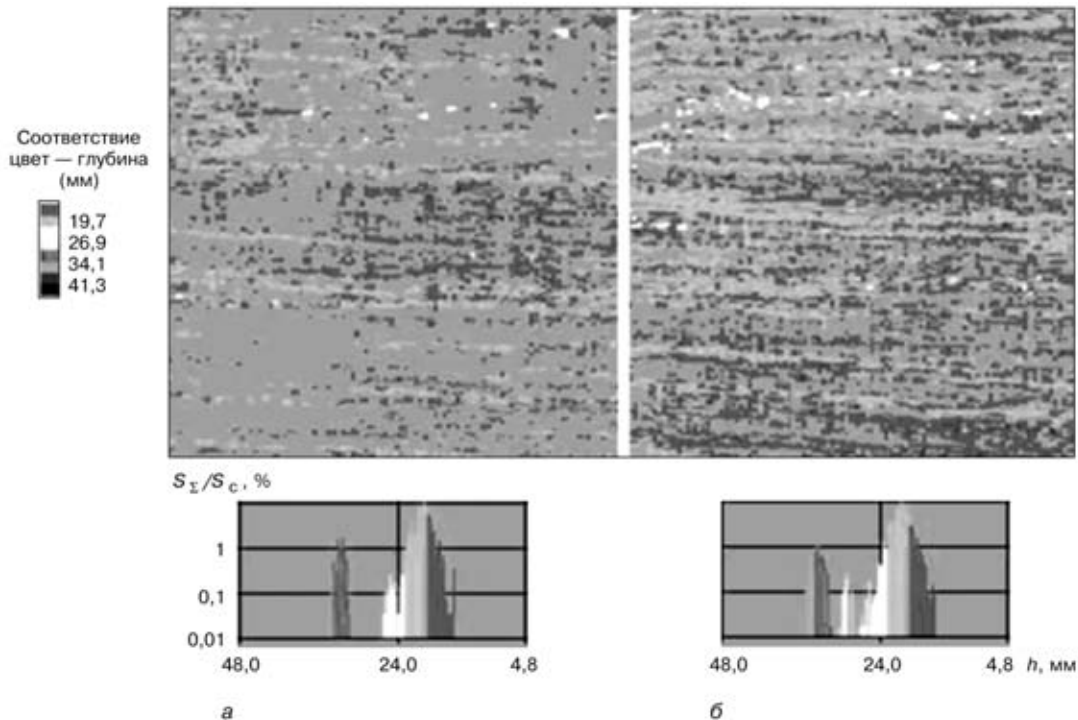


Рис. 3. Сравнение несплошностей в металле корпуса нефтеперерабатывающего аппарата: а — первое сканирование реперного участка размерами 750Х750 мм; б — его вторичное сканирование; внизу приведено распределение по толщине h отношения суммарной площади несплошностей S_{Σ} к площади сканирования S_c

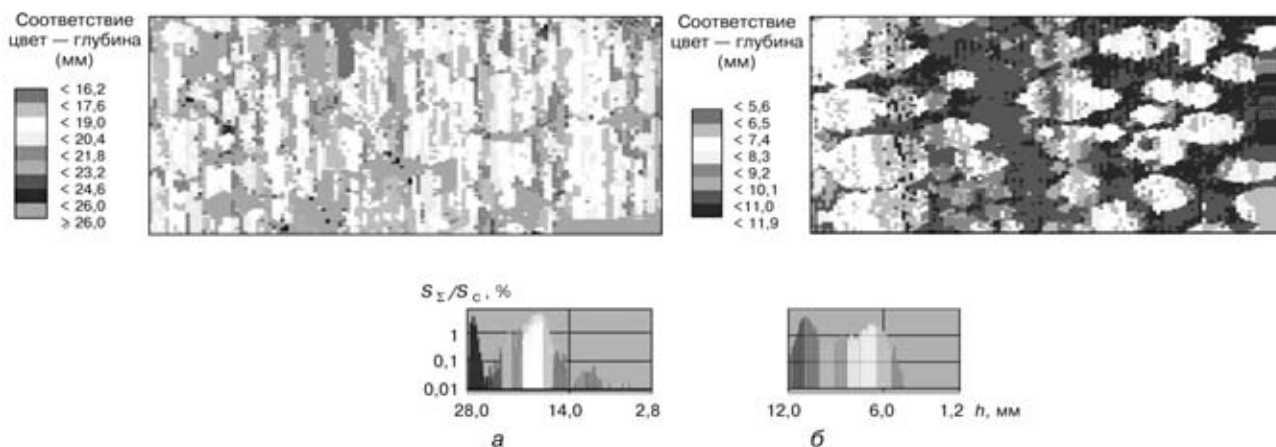


Рис. 4. Визуальное представление данных УЗ сканирования участка корпуса абсорбера, изготовленного из стали: а — 16ГС; б — Ст.3сп5; размер участков 250×500 мм; толщина металла 28 мм

эксплуатируемые свыше двадцати лет в близких технологических режимах (температура эксплуатации равна 30...50 °С; среда — 15 % водный раствор МЭА; углеводородный газ, содержащий H_2 и H_2S в различных весовых объемах).

На рис. 3 представлены результаты ультразвукового (УЗ) сканирования участка корпуса абсорбера, изготовленного из стали 09Г2С толщиной 48 мм. Этот контрольный участок находился вдали от ввода агрессивной среды и был выбран как реперный с целью определения средней скорости развития слоисто-водородного растрескивания за год эксплуатации. Как видно из рис. 3, на данном этапе развития процесс слоисто-водородного растрескивания носит как плоскостной, так и ступенчатый характер с доминирующей скоростью развития в направлении плоскости проката. Ступенчатый характер растрескивания в этом случае определяется значительной шириной сегрегационной зоны.

Показанный на рис. 4, а участок сканирования корпуса абсорбера, изготовленного из стали 16ГС толщиной 28 мм, расположен напротив ввода водородсодержащего газа. На рисунке достаточно четко просматриваются два слоя, подверженных слоисто-водородному растрескиванию, залегающих на глубине соответственно 12...16 и 18,5...24,0 мм от наружной поверхности. Последний находится на завершающей стадии растрескивания, о чем свидетельствует характерное ступенчатое развитие процесса по границам развитых несплошностей и видимое пластическое деформирование тонкой стенки под действием критических давлений молизванного газа в полостях (в зависимости от глубины залегания и размеров несплошностей давление может значительно превышать 10 МПа). Слой на глубине 12...16 мм подвержен менее интенсивному растрескиванию, что объясняется его экранированием более нагруженным слоем на глубине 18,5...24,0 мм.

Участок сканирования корпуса абсорбера, изготовленного из стали марки Ст.3сп5 толщиной 12 мм, несколько отличается характером слоистого растрескивания от рассмотренных выше. Как видно из рис. 4, б, размеры несплошностей в плоскости листа несколько меньше, чем на рис. 3, 4, а; ступенчатое развитие процесса слоистого растрески-

вания выходит на внутреннюю поверхность. В данном случае доминирующее развитие этого процесса происходит в направлении толщины листа. Подобный процесс растрескивания наблюдается также на изделиях из стали 20, что, как уже отмечалось выше, связано с особенностями структурной текстуры металлопроката и диффузионными процессами, идущими по границам залегания неметаллических включений. В целом развитие слоисто-водородных несплошностей зависит от достаточно большого количества факторов и их сочетаний во время эксплуатации. Естественно, что и скорость развития данных процессов может существенно изменяться в зависимости от области воздействия и влияния среды на рабочие части оборудования.

Во время диагностических обследований оборудования нефтехимической промышленности наибольшее внимание, естественно, уделялось зонам, подверженным наиболее интенсивному слоисто-водородному растрескиванию с целью определения максимальных скоростей и характера развития данного вида повреждений. В результате удалось выявить наиболее типичные зоны максимального развития слоистых водородных несплошностей для нефтеперерабатывающего оборудования. К ним в первую очередь следует отнести: область ввода водородсодержащих продуктов; места по линиям раздела сред; застойные зоны; области пластичес-

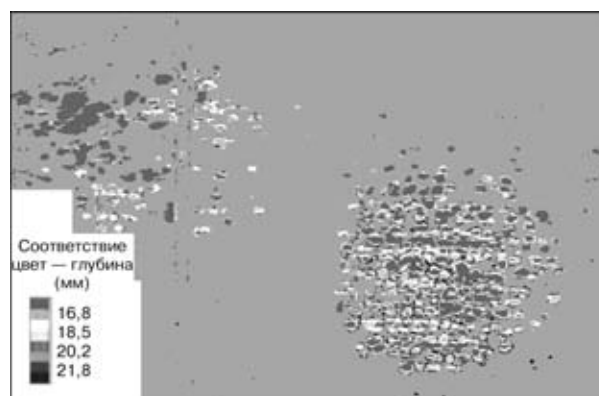


Рис. 5. Визуальное представление данных УЗ сканирования участка корпуса колонны, противоположного вводу продукта (водный раствор МЭА); размер участка 1600×2000 мм; толщина металла 22 мм

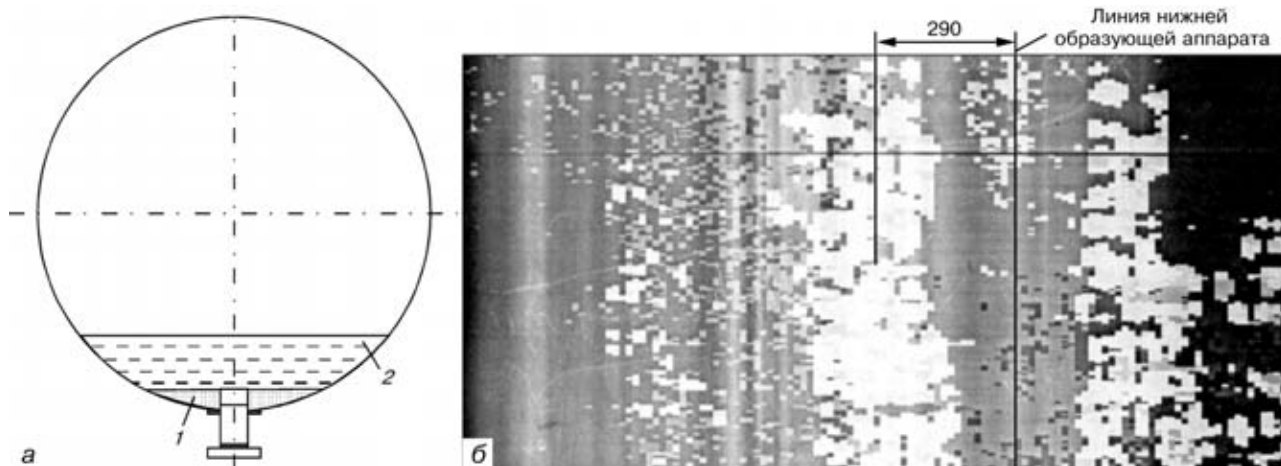


Рис. 6. Образование (а) застойной зоны 1 (2 — раздел фаз) и ее участок размером 1750×500 мм (б) с водородным расслоением металла (визуальное представление данных УЗ сканирования)

ких деформаций и зоны остаточных напряжений. В области ввода водородсодержащих продуктов, кроме относительно высокого содержания водорода, всегда наблюдается (в той или иной мере) воздействие потока (струи), которое способствует диффузионному насыщению металла в районе контакта и, как следствие, приводит к большим скоростям развития слоистого растрескивания, чем у других частей аппарата, удаленных от области ввода продукта. В качестве примера, иллюстрирующего сказанное выше, на рис. 5 приведена визуализация данных УЗ сканирования несплошностей на участке корпуса колонны, который располагался напротив ввода водного раствора МЭА в аппарат. В отличие от других участков колонны, которые также имели слоистые повреждения в металле, приведенная на рисунке область значительно отличается интенсивностью развития водородного растрескивания.

Достаточно частым случаем является водородное расслоение металла по линии раздела фазовых состояний сред. Как правило, такие места находятся в нижних частях аппарата. Например, для цилиндрических горизонтальных сепараторов наиболее интенсивные расслоения сосредоточены вдоль образующей корпуса аппарата на уровне колебания раздела сред (рис. 6, а).

В последние годы большинство оборудования зачастую эксплуатируется со значительными перерывами. Во время простоя из-за конструктивных особенностей возникают застойные зоны (рис. 6, а), что также в ряде случаев способствует более быстрому росту водородных расслоений. Так, на рис. 6, б показано слоисто-водородное растрескивание корпуса сепаратора в застойной области, образованной из-за выступающего патрубка. К характерным участкам, склонным к возможному интенсивному слоистому растрескиванию в водородсодержащих средах, относятся также области с остаточными напряжениями (например, зоны максимальных пластических деформаций при штамповке эллиптических днищ, места приварок вспомогательных элементов к корпусу и др.).

Из этого вытекают простые профилактические рекомендации по возможному замедлению процес-

сов слоисто-водородного растрескивания металла нефтехимического оборудования без изменения технологических режимов эксплуатации:

1) в местах возможных застойных зон усиление отверстий необходимо выполнять без выступающей части патрубка;

2) в районах подачи водородсодержащих сред в аппарат следует установить защитные экраны с целью предотвращения попадания прямой струи на стенку.

Дальнейшая эксплуатация нефтехимического оборудования, подверженного слоистому растрескиванию в водородсодержащих средах, естественно, требует его периодического контроля с целью выявления степени повреждения металла и динамики роста данного процесса. В этом случае определение технического состояния и оценка остаточного безопасного ресурса эксплуатации невозможны без условия адекватного описания несплошностей: реального размера, расположения (координат залегания), скорости их роста и т. д. Это общие требования, предъявляемые при проведении прочностного анализа объекта с несплошностями в металле. Из существующих видов НК для обнаружения и оценки внутренних несплошностей пригодны только два: акустический и радиационный. Поскольку радиационный принципиально не пригоден для работы с расслоениями, то фактически остается только один — акустический. Понимая эксплуатационные преимущества метода акустической эмиссии для оценки состояния оборудования с водородным растрескиванием, все-таки следует отметить, что в данном случае его возможности очень ограничены для количественных оценок и прогнозирования. Кроме того, применение этого метода сопряжено с существующими методическими трудностями. Поэтому если и возможно использование метода акустической эмиссии, то только для организаций с многолетней практикой подобных работ.

Возникает вопрос о возможности использования известной и весьма широко применяемой технологии ручного ультразвукового контроля (УЗК) для оценки слоисто-водородных несплошностей. Техника ручного контроля позволяет достаточно



легко выявлять слоистые несплошности. Однако их количественное описание на основе традиционной ручной технологии является весьма сложной задачей (если вообще возможной).

Это достаточно убедительно подтверждают приведенные в данной работе иллюстрации. Действительно, ведь речь идет не об отдельных несплошностях с четкими границами, а обычно о целых их совокупностях, лежащих на различных глубинах и перекрывающих друг друга. Еще сложнее оценить изменения размеров слоисто-водородных несплошностей во времени. Для этого необходимо проводить сравнительный анализ их геометрических характеристик, полученных во время периодических обследований. Провести такой анализ при помощи обычного ручного УЗ дефектоскопа практически нельзя из-за невозможности позиционирования положения преобразователя, а следовательно, и накопления и сохранения информации. Поэтому традиционная УЗ технология для определения размеров и оценки скорости роста слоисто-водородных несплошностей является малоприменимой и неэффективной, поскольку основана на субъективных оценках оператора. При этом свести субъективную составляющую к довольно малому значению путем усложнения и регламентации процедур не удастся в отличие от технологии контроля сварных соединений (даже в этом случае всем, кто проводил практический УЗК сварных соединений, известны сложности с формализацией геометрически сложных несплошностей). Поэтому в лучшем случае можно говорить о применении ручной технологии УЗК для качественных оценок типа больше-меньше и предварительного экспресс-анализа.

Как показали результаты практических обследований, наиболее полную документированную картину степени и характера поврежденности слоистыми растрескиваниями нефтеперерабатывающего оборудования дают компьютеризированные системы УЗК, позволяющие сохранять результаты сканирования поврежденных участков. Это в дальнейшем дает возможность по результатам повторного контроля реперных участков оценить скорость развития растрескивания и определить, на какой стадии находится данный процесс. Последнее базируется на многочисленных результатах обследований оборудования, полученных при использовании УЗ автоматизированной системы, а также расчетных моделях достижения критических состояний в зависимости от характера слоистого растрескивания в водородсодержащих средах. Это позволяет в зависимости от глубины залегания, характера повреждений и разработанных расчетных моделей установить максимально допустимые размеры дефектов (площадь и глубину растрескивания, диаметр пластических вспучиваний металла и т. д.), до достижения которых возможна дальнейшая эксплуатация оборудования без проведения капитального ремонта поврежденных мест.

Такой подход к оценке технического состояния оборудования, подверженного слоисто-водородным повреждениям на начальных стадиях развития, позволяет установить периодический контроль за его состоянием непосредственно на местах служ-

бами технического надзора заводов без дополнительного привлечения специалистов.

Применение современных автоматизированных систем контроля позволяет разработать технологию диагностирования объектов с водородными расслоениями и оценить количественно дальнейший гарантированный безопасный срок возможной эксплуатации нефтехимического оборудования. В основе такого подхода лежат новые возможности мониторинга оборудования ответственного назначения, которые реализуются современными УЗ системами НК:

1. *Объективность данных.* Данные УЗК собираются при помощи механических сканеров с высокой точностью и заданной плотностью. При этом субъективная оценка оператора отсутствует, а процесс сбора информации достаточно легко формализуется.

2. *Сохранение параметров контроля и данных сканирования.* Все параметры контроля и данные сканирования доступны для последующего анализа и сохранения в электронном виде на современных носителях. Это позволяет создавать долгосрочные архивы, на базе которых можно проводить сравнительный анализ изменения несплошностей. Попытки его проведения существуют и в обычной практике ручного УЗК, но, как уже упоминалось, из-за субъективности информации и ее ограниченного объема, доступного для сохранения, такой анализ не очень эффективен. Известно, что подобная практика не находит широкого применения и не отражена в нормативных документах.

3. *Высокая информативность.* Количество информации не сопоставимо с тем, которое доступно при ручном контроле. Здесь следует привести такой пример. Инструкции ручного УЗК предусматривают анализ сигналов, амплитуда которых выше некоторого установленного уровня. Сигналы с меньшей амплитудой не рассматриваются, что снижает достоверность контроля. В отличие от этого автоматизированные системы контроля позволяют получить доступ к УЗ сигналам любой амплитуды, начиная с уровня шумов, что весьма актуально для эксплуатационного контроля, где приходится отслеживать развитие несплошностей и оценивать динамику их развития.

4. *Применение относительно сложных схем контроля.* Появляется возможность использовать специальные схемные решения, которые могут включать несколько преобразователей, что дает возможность повысить достоверность обнаружения и идентификации несплошностей.

5. *Математическая обработка данных.* Это становится актуальным в связи с высокой информативностью и специальными схемными решениями. По существу речь идет о пространственно-временном анализе или фильтрации информации. Преимущества таких решений хорошо известны, в том числе и в области НК (ALOK, SAFT). В связи с постоянно растущей доступностью и эффективностью программно-аппаратных средств математические методы интенсивно развиваются и внедряются в практику НК.



6. *Экспертный анализ информации.* Применение современных систем контроля позволяет более рационально использовать квалификацию персонала и одновременно повысить качество работ до экспертного уровня. Условно работа разбивается на два этапа — сбора и обработки информации. Первый легко поддается формализации и может осуществляться персоналом с довольно низкой квалификацией. Однако процесс сбора информации всегда сопровождается высокой трудоемкостью и большими потерями времени. С другой стороны, всегда существует дефицит в квалифицированном персонале, который в данном случае можно сосредоточить на более ответственных и сложных этапах работы — анализе накопленной информации и ее интерпретации в форме, пригодной для проведения количественного прочностного расчета. При этом в ряде случаев, когда достоверная расшифровка невозможна, могут потребоваться повторные сканирования по специальным (не штатным) схемным решениям. Собственно, это и является задачей экспертного контроля. Поскольку весь анализ и оценка данных сканирования осуществляется специалистами высокой квалификации, то появляется возможность реально контролировать и выполнять всю работу на экспертном уровне.

7. *Сравнительный анализ.* Поскольку процесс сканирования можно повторять с высокой точностью, то становится возможным проводить сравнение данных, полученных на одном и том же участке, но в разное время (см. рис. 2). В результате сравнения можно установить не только факт роста несплошностей, но также и скорость их роста, что чрезвычайно важно при расчетной оценке возможного дальнейшего безопасного срока службы оборудования.

Таким образом, техническое диагностирование оборудования, подверженного слоисто-водородному растрескиванию, и определение безопасных сроков его дальнейшей эксплуатации невозможны без решения следующих основных задач. Первая задача заключается в создании надежных и относительно недорогих систем УЗК, а также совершенствования методик НК, позволяющих определять геометрические характеристики, скорость и характер развития слоистого растрескивания. Ко второй относится использование современных прочностных подходов к оптимальной оценке размеров возмож-

ного безопасного развития несплошностей в зависимости от глубины их залегания и изменяющегося давления в полостях.

ВЫВОДЫ

1. Техническое диагностирование и мониторинг объектов с водородным растрескиванием металла целесообразно осуществлять на базе современных компьютеризированных УЗК. Это дает возможность проводить количественный прочностной анализ нефтехимического оборудования со слоисто-водородным растрескиванием, что со своей стороны позволяет более рационально подойти к мониторингу, оценке технического состояния, определению сроков дальнейшей эксплуатации, а главное — своевременно предупредить аварийное состояние оборудования.

2. Проведение профилактических мероприятий, направленных на уменьшение скорости водородного растрескивания в местах возможных застойных зон и ввода агрессивных водородсодержащих и сероводородных сред (удаление выступающих частей патрубков и экранирование потока), позволяет значительно продлить сроки службы оборудования без изменения его технологических режимов эксплуатации.

3. При капитальном ремонте и изготовлении нового оборудования из низколегированных и малоуглеродистых сталей, эксплуатируемого в водородсодержащих средах, в числе основных требований к выбору материала должны быть его однородность с изотропностью служебных характеристик и пониженное содержание неметаллических включений.

1. *Некоторые* результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности // В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.
2. *Слоистое*, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений // В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова / Проблемы прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
3. *Карпенко Г. В.* Нові уявлення про вплив водню на властивості сталі // Прикладна механіка. — 1960. — 6, № 4. — С. 361–367.
4. *Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И.* Влияние водорода на свойства стали. — М.: Изд-во лит. по чер. и цв. металлургии, 1962. — 196 с.