

УДК 621.791.052:620.179.16

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКЦИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

В. А. ТРОИЦКИЙ, д-р техн. наук, **В. П. ДЯДИН**, **Е. А. ДАВЫДОВ**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы результаты диагностики нефтехимического оборудования, полученные специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАН за последние 10 лет. Определены наиболее характерные участки аппаратов, склонных к эксплуатационным повреждениям, и предложены методы их контроля на базе УЗД. Отмечено, что наиболее часто встречающейся ошибкой при ремонте сварных соединений теплоустойчивых сталей является неполный их отпуск в зонах стыковки элементов, выполненных из различных конструкционных материалов. Предложены рекомендации по выбору материалов при замене оборудования, исчерпавшего свой срок эксплуатации.

Ключевые слова: сварные конструкции, эксплуатационный дефект, диагностика, низкотемпературное водородное расслоение, трещина, высокотемпературное растрескивание, термообработка, влияние среды, ультразвуковой контроль

В связи с резким увеличением цен на энергоносители и износом основного оборудования значительная часть предприятий нефтегазового комплекса нуждается в техническом переоснащении. Проведение реконструкции в первую очередь связано как с необходимостью уменьшения энергозатрат при производстве того или иного вида продукции, так и с увеличением глубины переработки используемого сырья.

Учитывая, что значительная часть дорогостоящего оборудования находится в эксплуатации более 20–30 лет, речь может идти только о его поэтапной модернизации.

Таким образом, возникает необходимость дальнейшего использования части технологического оборудования, отработавшего свой нормативный срок эксплуатации, что, в свою очередь, требует разработки более точных методов неразрушающего контроля и оценки возможной его дальнейшей эксплуатации.

В последние годы появились достаточно совершенные методы ультразвукового (УЗ) контроля на основе анализа времени прихода дифрагированных УЗ волн, отраженных от острых краев внутренних дефектов. Эти методы, условно обозначаемые как TOFD, SAFT, тандем и т. п., позволяют находить трещины, коррозионные, водородные и другие растрескивания, которые возникают в процессе эксплуатации.

К основным условиям эксплуатации сварных конструкций обычно относят среду, с которой они контактируют, нагрузки, температуру, радиацию и время их совокупного воздействия.

Влияние нагрузки различают по длительности воздействия и скорости приложения (статические, циклические, динамические и др.). Нагрузки могут возникать как от внешних воздействий, так и собственных деформаций при структурных превращениях и неравномерных нагревах. В сочетании с формой сварных соединений и элементов конструкций образуются сложные локальные напряжения, которые оказывают влияние на прочность и дальнейшую работоспособность сварных конструкций.

Различают циклический и динамический характер нагружения, который также относят к наиболее тяжелым режимам работы сварных конструкций. Многие стали чувствительны к скорости приложения нагрузок, особенно при наличии концентраторов напряжений, что, в свою очередь, требует проведения термической обработки после сварки и предъявления более жестких требований к нормам неразрушающего контроля ответственных элементов.

Для обеспечения устойчивости сварных конструкций при воздействии больших сжимающих усилий основное значение играет толщина применяемого металла, форма конструктивных элементов. Температурные требования также существенно зависят от материала. Например, черные металлы характеризуются пониженной прочностью при наличии концентраторов напряжений, что диктует определенные требования к выбору металла, его термообработки и к допускаемым размерам дефектов.

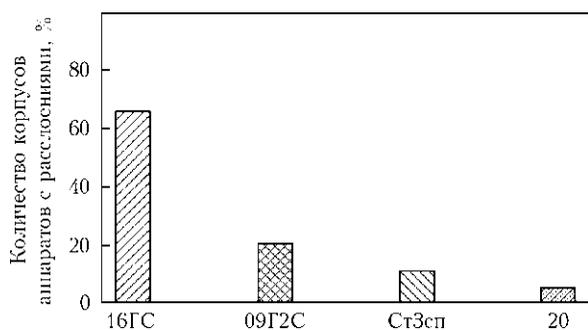


Рис. 1. Доля корпусов аппаратов с обнаруженными в них коррозионными расслоениями

Особая ситуация возникает в области высоких температур эксплуатации оборудования, где важен правильный выбор соответствующей жаропрочной стали. В противном случае при длительном воздействии температуры это может привести к изменению прочности и пластичности материала, его структуры, тепловому охрупчиванию и разрушению.

Влияние среды на конструкцию еще более разнопланово. Например, коррозия металла при сочетании с нагрузками дает коррозионное растрескивание и усталость. Влияние температуры и нагрузок еще более усугубляет ситуацию.

Ниже приведены результаты технической диагностики оборудования нефтехимической промышленности, проведенные сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона за последние десять лет.

Наряду с накоплением данных о характерных дефектах и совершенствованием методик неразрушающего контроля также исследовали различные аспекты возможной деградации служебных свойств конструкционных материалов и сварных соединений в агрессивных средах при нормальных и повышенных температурах.

Коррозионные повреждения нефтехимического оборудования (НХО) при переработке нефти вызываются ее неизбежными примесями [1]: сера-, хлор-, кислородоорганическими соединениями, пластовой водой и продуктами их термического расщепления. Агрессивность возникающих компонентов определяется как составом сырья, так и параметрами режима технологических процессов при его переработке (давление, температура и др.). Можно выделить следующие факторы, обуславливающие коррозионное разрушение НХО:

- расщепление сернистых соединений нефти и хлоридов, приводящих к образованию агрессив-

ных составляющих, таких, как хлористый водород и сероводород;

- наличие водных электролитических сред, способствующих коррозионному растрескиванию, низкотемпературному водородному расслоению и водородной хрупкости сталей;

- применение щелочных агентов, способствующих возникновению каустической хрупкости сварных соединений из черных металлов;

- образование сероводорода при высоких температурах, приводящих к ускорению коррозионных процессов;

- увеличение агрессивности охлаждающих вод;

- появление кислых соединений (нафтеновые кислоты);

- наличие двухфазных сред и др.

Учитывая подвижность коррозионных сред в процессе переработки нефти, также создаются условия для возникновения комбинированных форм коррозионного разрушения (сочетание питтинговой коррозии с коррозионным растрескиванием, коррозии под напряжением с межкристаллитным растрескиванием и др.).

Многолетние обследования НХО, которое эксплуатировалось в широком диапазоне температур, давления, агрессивности среды, содержания H_2 , H_2S и др., позволили выявить большое количество случаев низкотемпературных слоисто-водородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. На рис. 1 приведена гистограмма распределения повреждений по маркам сталей относительно общего количества исследованных случаев. На качественном уровне рис. 1 хорошо отражает реальное состояние оборудования. Так, наибольшую склонность к низкотемпературному слоистому водородному расслоению проявляют металлоконструкции, изготовленные из сталей марок 16ГС и 09Г2С, в отличие от аппаратов, изготовленных из сталей марок сталь 20, сталь СтЗсп.

Анализ технического состояния НХО показывает, что различие в степени повреждаемости в основном связано с особенностями структурной текстуры металлопроката [2] и диффузионными процессами, идущими по границам залегания неметаллических включений [3, 4]. Это лишний раз подчеркивает необходимость как пересмотра класса сталей, пригодных для изготовления НХО, эксплуатируемого в сероводородных средах, так и использования методик ультразвукового контроля (УЗК) на основе регистрации дифрагированных УЗ колебаний.

На практике выявлено значительное количество случаев, когда изготовленное оборудование из сталей марок 09Г2С и 16ГС, без уточнения требований к их категориям, подвергалось отб-

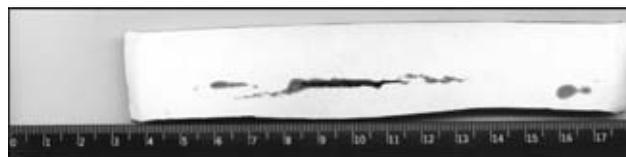


Рис. 2. Слоистое растрескивание по толщине листа

Соответствие
цвет-глубина
залегания

19,7 мм
26,9
34,1
41,3

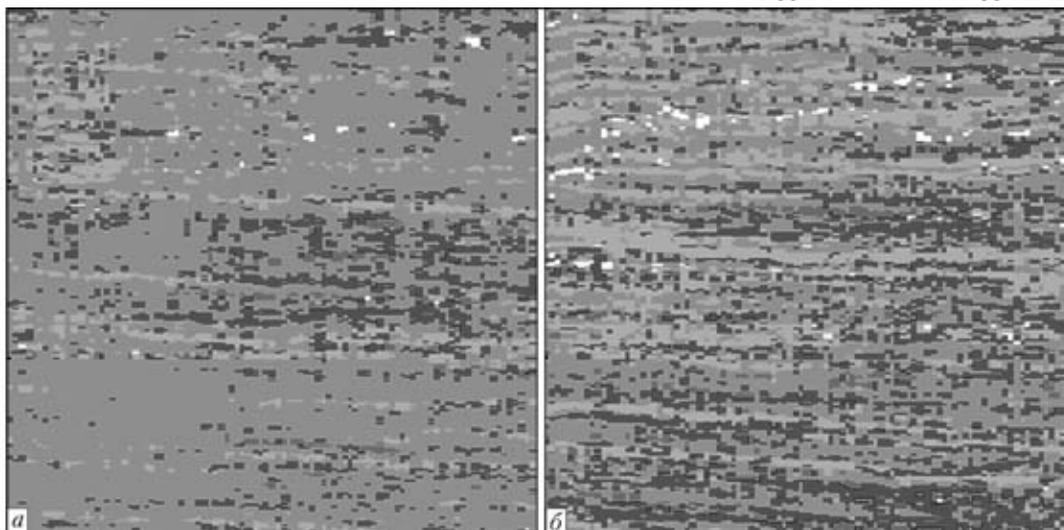


Рис. 3. Контроль роста несплошностей в металле корпуса абсорбера из стали 09Г2С толщиной 48 мм за год эксплуатации (реперный участок размером 750×750 мм): *a* — первичное сканирование; *б* — повторное сканирование того же участка через год

раковке уже через 2–4 года эксплуатации. Для металлопроката с резко выраженной зональной сегрегацией, залегающей на глубинах, равных половине или трети толщины листа, слоистые растрескивания развиваются в зоне, характеризующейся значительной анизотропией прочностных свойств в направлении толщины. Данный тип повреждений может отличаться по своей скорости развития в плоскости листа, носить ступенчатый или плоскостной характер. По мере накопления повреждений в дальнейшем может наблюдаться деформирование более тонкой стенки под действием внутреннего давления.

Исследования металлопроката УЗК системой P-Scan показали, что с повышенным содержанием серы и более равномерным распределением сульфидных включений по толщине листа слоистые растрескивания в основном носят ступенчатый характер (рис. 2).

Слоистому водородному растрескиванию НХО, изготовленному из низколегированных сталей 16ГС, 09Г2С и низкоуглеродистой стали СтЗсп5, подвергались газовые абсорберы, которые находились в эксплуатации свыше 20 лет при температурах 30...50 °С в средах, содержащих 15%-й водный раствор моноэтаноламина (МЭА), углево-

дорородный газ, а также H_2 и H_2S в различных массовых процентах.

На рис. 3 представлены дефектограммы участков сканирования корпуса абсорбера из стали 09Г2С толщиной 48 мм. Обследуемый участок находился вдали от ввода агрессивной среды. Видно, что процесс слоистого 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 толщиной сегрегационной зоны. На рис. 4 показан участок сканирования корпуса абсорбера, расположенный напротив ввода водородсодержащего газа (сталь 16ГС, толщина 28 мм). На рисунке достаточно четко просматриваются два слоя, подверженных слоистому водородному растрескиванию, залегающих на глубинах 12...16 и 18,5...24 мм от наружной поверхности. Слой на глубине 18,5...24 мм находится на завершающей стадии, о чем свидетельствует ступенчатое развитие процесса растрескивания по границам развитых несплошностей и видимое пластическое деформирование тонкой стенки под действием давления молизованного газа в полосках. Слой на глубине 12...16 мм подвержен менее интенсивному растрескиванию. Последнее объясняется его экранированием слоем на глубине залегания 18,5...24,0 мм.

Участок сканирования корпуса абсорбера, изготовленного из стали марки СтЗсп5 толщиной 12 мм, имеет некоторые отличия в характере слоистого растрескивания от рассмотренных выше. Как видно из рис. 5, размеры несплошностей в плоскости листа несколько меньше, чем на рис. 3, 4, ступенчатое развитие процесса слоистого растрескивания выходит на внутреннюю поверхность.

Соответствие
цвет-глубина
залегания

<16,2 мм
<17,6
<19,0
<20,4
<21,8
<23,2
<24,6
<26,0

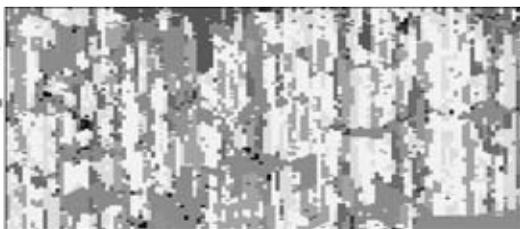


Рис. 4. Данные сканирования на участке корпуса абсорбера, изготовленного из стали 16ГС толщиной 28 мм (размер участка 250×500 мм)



Рис. 5. Фрагмент участка сканирования с водородным растрескиванием элемента корпуса абсорбера, изготовленного из стали СтЗсп5 толщиной 12 мм (размер участка 250×250 мм)

В данном случае доминирующее развитие процесса водородного растрескивания происходит в направлении толщины листа. Подобный процесс растрескивания наблюдается и для стали 20, что также связано с особенностями структурной текстуры металлопроката и диффузионными процессами, идущими по границам залегания неметаллических включений.

В процессе диагностических обследований НХО особое внимание уделялось зонам, подверженным наиболее интенсивному слоистому водородному растрескиванию. К ним в первую очередь следует отнести область ввода водородсодержащих продуктов; участки по линиям раздела сред; застойные зоны; области пластических деформаций и зоны остаточных напряжений.

В области ввода водородсодержащих продуктов, кроме относительно высокого содержания водорода, всегда присутствует в той или иной мере действие потока (струи), которое способствует диффузионному насыщению металла в районе контакта, и как следствие, приводит к большим скоростям развития слоистого растрескивания по сравнению с другими частями аппарата. В качестве примера на рис. 6 приведена ультразвуковая оценка несплошностей на участке корпуса колонны. Указанный участок располагался напротив ввода водного раствора МЭА в аппарат. В отличие от других участков колонны, которые также имели слоистые повреждения в металле, приведенная

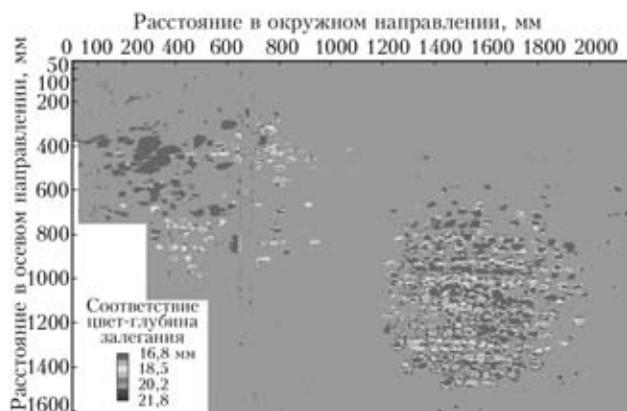


Рис. 6. Данные сканирования на участке корпуса колонны, противоположного вводу продукта (водный раствор МЭА) (размеры участка 1600×2000 мм, толщина металла 22 мм)

на рисунке область отличается значительной интенсивностью развития водородного растрескивания. Как правило, такие области носят локальный характер, что позволяет провести их ремонт без демонтажа колонны. В последнее время на отечественных предприятиях нефтепереработки участились случаи полной замены обечеек в зонах ввода продукта, что, кроме значительного удорожания ремонтных работ, никак не влияет на дальнейшую работоспособность оборудования.

Достаточно частым случаем является сочетание питтинговой коррозии с низкотемпературным водородным расслоением металла по линии раздела фазовых состояний сред. Как правило, такие места находятся в нижних частях аппарата. В этом случае для сепараторов и теплообменных аппаратов зона основной коррозии находится вдоль образующей корпуса аппарата на уровне колебания раздела сред или в зонах смачивания.

Так, на рис. 7 приведена комбинированная форма коррозионного повреждения корпуса сепаратора в застойной области, образованной из-за выступающего патрубка.

К характерным участкам, склонным к возможному интенсивному низкотемпературному слоистому растрескиванию в водородсодержащих средах, относятся также области с наличием остаточных напряжений (например, зоны максимальных пластических деформаций при штамповке эллиптических днищ, места приварок вспомогательных элементов к корпусу и др.).

Влияние остаточных напряжений в сварных соединениях довольно отчетливо проявляется при диагностике щелочных емкостей, изготовленных из сталей марок 16ГС и 09Г2С. В этих аппаратах, отработавших нормативные сроки эксплуатации при температурах свыше 50 °С и концентрации щелочи не менее 10 %, периодически встречаются центральные продольные трещины в Т-образных сварных соединениях глубиной до 10 мм и более (в ряде случаев наблюдались трещины в околосшовных зонах монтажных швов). При заказе данного типа оборудования рекомендуется предусматривать его высокий отпуск.

Что касается высокотемпературной сероводородной коррозии, то данный тип повреждений наблюдается при эксплуатационных температурах

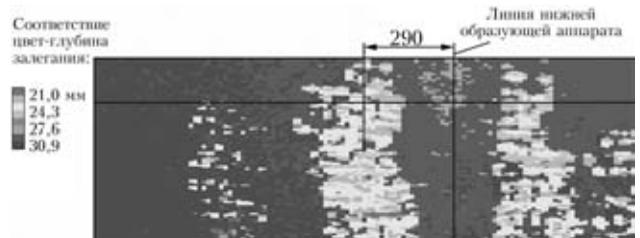


Рис. 7. Данные сканирования металла с коррозионным повреждением в застойной зоне сепаратора толщиной 32 мм из стали 16ГС (размер участка 500×1750 мм)



Рис. 8. Высокотемпературное растрескивание сварного шва теплообменника, изготовленного из стали 12ХМ, в зоне ремонтной подварки

свыше 260 °С в трансферных трубопроводах, змеевиках печей и соединенных с ними теплообменных аппаратах в виде мелких широких язв, переходящих одна в другую. В чистом виде такой вид коррозионного разрушения довольно легко выявляем, однако высокая скорость развития требует особых подходов к его неразрушающему контролю. В комбинированном варианте данный вид коррозионного повреждения является наиболее опасным в связи с развитием растрескивания сварных соединений в местах скопления цепочек мелких язв и появлением сквозных трещин. Влияние остаточных напряжений в этих случаях особенно велико. Несмотря на то что практически все силовое оборудование изготовлено из хромо-молибденовых сталей, предусматривающих обязательную термообработку после сварки, не всегда удается снять остаточные напряжения полностью. За данный период обследования специалистами ИЭС им. Е. О. Патона выявлено значительное количество растрескиваний сварных соединений, приводящих к аварийному отключению ответственного силового оборудования и установок в целом из-за появления сквозных трещин и пропуска продукта практически на всех нефтеперерабатывающих заводах Украины. Так, на рис. 8 приведен участок сварного шва с возникшей трещиной через год после проведения ремонтных работ в силовом теплообменнике.

Наиболее характерными элементами, подверженными такого рода повреждениям, являются участки сварных соединений в местах приварок патрубков, элементов трансферных трубопроводов и обечаек теплообменников к фланцам. В большинстве случаев появление дефектов в данных соединениях связано с неполным отпускком

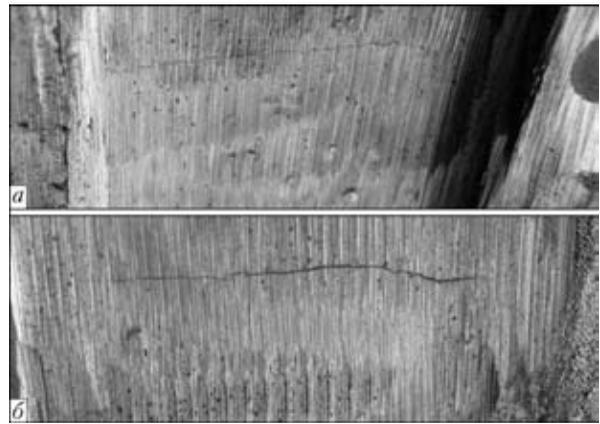


Рис. 9. Высокотемпературное растрескивание кольцевых швов в зоне фланцевого соединения (сталь 15Х5МУ) с обечайкой теплообменника (сталь 12ХМ) различной толщины: *а* — сварной шов приварки обечайки теплообменника к днищу толщиной 35 мм; *б* — сварной шов в зоне соединения обечайки толщиной 45 мм к фланцу

сварного соединения из-за различия материалов соединяемых элементов (рис. 9).

В теплообменном оборудовании длина таких дефектов обычно не превышает ширину сварного шва из-за наличия остаточных сжимающих напряжений в металле ЗТВ, что сдерживает их развитие в этом направлении. В направлении толщины такие ограничения отсутствуют, что и приводит к появлению сквозных «коротких» трещин.

Для трансферных трубопроводов подобное растрескивание обычно происходит по линии сплавления приварки фланца к трубе, в этом случае немаловажную роль играют изгибные напряжения, возникающие из-за теплового расширения трубопровода, что и приводит к частичному или полному разрыву.

Межкристаллитное растрескивание защитных облицовочных швов и основного плакирующего слоя оборудования, выполненного из биметалла, также довольно частое явление в нефтехимическом производстве. Вместе с тем если глубина межкристаллитного растрескивания плакирующего слоя биметалла обычно ограничивается толщиной плакировки в связи с наличием тонкой мартенситной прослойки на границе перехода к легированному металлу, то в облицовочных швах она в значительной мере зависит от правильного выбора сварочных материалов и технологии сварки. Зафиксировано несколько случаев, когда в результате таких нарушений наблюдались протяженные трещины глубиной более половины сечения [5]. В качестве примера на рис. 10 представлен результат измерения глубины подобной трещины с помощью метода TOFD. Следует отметить, что УЗ технология позволяет достаточно точно (с погрешностью 1...2 мм) измерить размеры трещин, информация о которых необходима для оценки работоспособности объекта контроля. В обычной практике диагностических обследований оценку

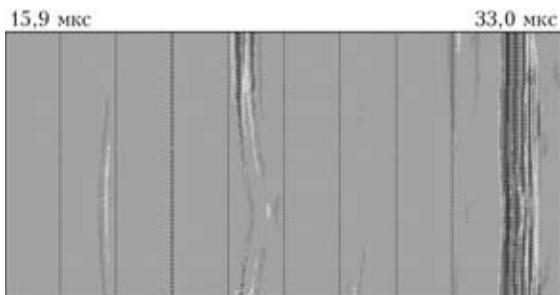


Рис. 10. Пример измерения в сварном соединении трещины методом TOFD, которая первоначально инициирована растрескиванием облицовочного лакирующего слоя

размеров трещин получают выборкой, что связано с рядом технологических трудностей. Следует отметить, что использование метода TOFD в объектах с лакированной поверхностью имеет ряд специфических особенностей, поэтому от специалистов, проводящих измерения, требуется определенная квалификация и опыт. Следует отметить повышенную чувствительность стали 10X18H10T к такому виду повреждений в отличие от стали 08X13.

Усталостные разрушения, за исключением резервуаров, довольно редкое явление в нефтехимии. Вместе с тем на ряде предприятий зафиксирован рост технологических трещин в сварных соединениях опорных частей и накладках с развитием их в основной корпус реакторов коксовых камер под действием термических циклических напряжений и колебаний.

Что касается хрупких разрушений, то практически все случаи имели место после проведения ремонтно-восстановительных работ при неполном удалении дефекта с последующей его переплавкой. В большинстве хрупкие разрушения были

вызваны деформационным старением и наводороживанием металла перед фронтом не полностью удаленного дефекта. В последнее время подобные разрушения имели место при ремонте вакуумных колонн на ряде предприятий Украины и России.

Выводы

1. Проанализированы характерные зоны НХО, наиболее склонные к повреждениям в процессе эксплуатации. Предложены рекомендации к требованиям выбора конструкционных материалов для изготовления и ремонта НХО, позволяющие снизить риск эксплуатационного повреждения оборудования.

2. Показано преимущество ультразвуковых компьютеризированных систем за контролем роста эксплуатационных дефектов при диагностике НХО.

1. Шрейдер А. В., Дегтярева Г. Л., Дьяков В. Г. Защита от коррозии оборудования для переработки нефти. — М.: Недра, 1964. — С. 107–120.
2. Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
3. Карпенко Г. В. Нові уявлення про вплив водню на властивості сталі // Приклад. механіка. — 1960. — 6, № 4. — С. 361–367.
4. Карпенко Г. В., Крипякевич Р. И. Влияние водорода на свойства стали. — М.: Изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1962. — 196 с.
5. Некоторые результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности / В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.

Results of diagnostics of oil-and-gas equipment conducted by specialists of the E.O.Paton Electric Welding Institute during the last 10 years were analysed. The most characteristic regions of the devices susceptible to service damages were determined, and methods for testing them by the ultrasonic inspection methods were suggested. It is noted that the most frequent error in repair of welded joints on heat-resistant steels is their incomplete tempering in the zones of contact of elements made from different structural materials. Recommendations are proposed to select materials for replacement of equipment that exhausted its specified service life.

Поступила в редакцию 09.03.2010