

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И РЕМОНТА ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ РЕАКТОРА БИЛИБИНСКОЙ АЭС

Р. РОЗЕРТ, канд. техн. наук (г. Альтлайнинген, Германия),

А. В. ШУТИКОВ, М. Е. ФЕДОСОВСКИЙ, канд. техн. наук, Е. И. ЛУКИН, М. В. КАРАСЕВ, д-р техн. наук  
(НПФ «Инженерный и технологический сервис», г. С.-Петербург, РФ)

Существует множество случаев выхода из строя деталей узлов или целых систем из-за несвоевременного выявления их отказа. Показана возможность сложных решений ремонта в критических для безопасности случаях, в том числе труднодоступных зонах промышленных установок в России. Речь идет о комплексных автоматизированных и частично дистанционно управляемых системах, изготовленных в России и применяемых в газовой промышленности и энергетике.

*Ключевые слова:* восстановление с помощью сварки и наплавки, газовая промышленность и энергетика, диагностика объектов, универсальные роботизированные комплексы

Существует множество случаев выхода из строя деталей, узлов и целых систем из-за несвоевременного обнаружения или затрудненного доступа к источникам повреждения. Восстановить объект может помочь система, позволяющая провести диагностику возможных слабых мест и обеспечить замену или ремонт дефектного узла. К труднодоступным объектам часто относят трубчатые конструкции или сосуды. Доступ может быть затрудненным или невозможным при опасных дозах излучения, высоких температурах или наличии ядовитых газов. В последние годы для таких условий разработаны автоматизированные и роботизированные диагностические системы, обслуживаемые человеком с помощью соответствующего дистанционного управления и исключающие угрозу его здоровью.

**Системы диагностики для газовой промышленности и энергетике.** В этих отраслях перспективно применение сложных технических роботизированных систем, характеризующихся следующими возможностями: перемещением на любой поверхности, в том числе в принудительном положении и в тесном пространстве; использованием для диагностики любых систем измерения; установкой инструмента для проведения ремонта, в частности, для очистки и сварки; проведением монтажных работ; проведением работ в условиях повышенной температуры и излучения.

Эти новые дистанционно управляемые системы все больше применяются для диагностики и ремонта в труднодоступных и критических с точки зрения безопасности местах. При этом для

различных случаев разработаны разные системы. Для диагностики технического состояния внутренних поверхностей трубопровода насосных и компрессорных станций уже существуют комплексные дистанционно управляемые системы. Как правило, на таких станциях есть прямые и изогнутые во многих плоскостях трубы.

На рис. 1 показан робот, способный гибко перемещаться внутри сети труб как в горизонтальном, так и вертикальном направлении. С помощью установленных под углом 120° гусеничных лент, которые могут перемещаться по высоте относительно друг друга, этим роботом можно контролировать трубопроводы с номинальным внутренним диаметром от 700 до 1400 мм. Максимальная зона перемещения 500 м.

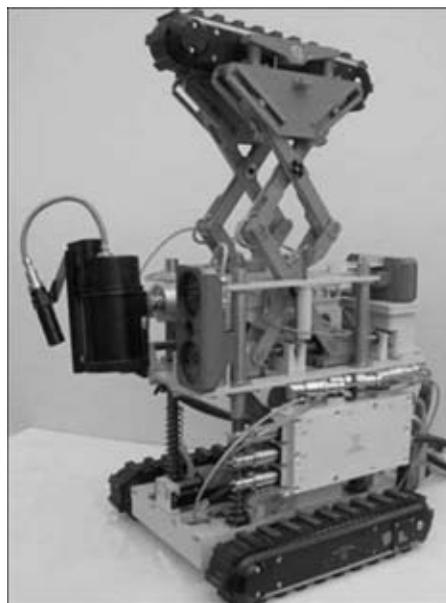


Рис. 1. Диагностический робот с электромагнитно-акустическим сенсором



**Перечень работ за период с 2008 по 2010 г., выполненных с помощью взрывобезопасной системы измерения**

Перечень работ	2008	2009	2010
Количество обследованных компрессорных станций	16	9	21
Длина обследованных труб, м	2411	1098	1593
Объем контроля: визуальный и обмер сварных швов, шт.	2411	1098	1593
ультразвуковой контроль всех труб, м	23893	21516	25488
Обнаруженные дефекты, шт. в сварном шве	205	89	249
в теле трубы	671	656	1466
Незамедлительно требуется ремонт тела трубы	273	72	75

Благодаря различным взрывобезопасным системам измерения, установленным на работе, можно получить информацию о состоянии внутренней поверхности трубы, положении и виде сварных швов на основании визуального контроля; возможных подрезов, внутренних дефектах, а также трещинах и загрязнениях вследствие ультразвукового контроля; коррозии поверхности и изменении толщины стенки или глубины эрозии; данных технического состояния системы труб с целью определения необходимости ремонта или замены участков труб.

С помощью этой системы в 2004–2010 гг. было обследовано 130 км труб и трубных решеток. В результате выявлено и отремонтировано более 500 различных опасных дефектных мест. Каждый из них мог привести к взрыву газа. Перечень работ за период 2008–2010 гг., проведенных с помощью взрывобезопасной системы, представлен в таблице.

В Санкт-Петербурге организовано обучение работе с этой системой на опытном стенде со встроенными трубами с различными дефектами, на котором прослеживаются особенности работы системы в реальных условиях (рис. 2).



Рис. 2. Опытный стенд с искусственными и естественными дефектами

На рис. 3 приведены встречающиеся на практике дефекты труб. Предусмотрено усовершенствование автоматической диагностической системы таким образом, чтобы на длине до 1000 км достичь производительности минимум 80 пог. м/ч, получая при этом изображение в формате 3D.

Применение данной диагностической системы позволяет значительно сэкономить средства по сравнению с методом, когда пораженные участки трубы вскрываются со всеми соответствующими рабочими этапами. Опыт, накопленный при разработке комплексной дистанционно управляемой диагностической системы для газовой промышленности и энергетики, можно использовать при разработке автоматизированных систем для диагностики и восстановления АЭС.

**Разработка технологии диагностики и ремонта оборудования АЭС с использованием сварки.** В рамках предусмотренной ревизии реактора № 1 на Билибинской АЭС (рис. 4) (Россия) были обнаружены дефекты в так называемом биологическом защитном экране, заключенном во внешнюю и внутреннюю стальную оболочку.

Поскольку речь идет о пространстве, критическом с точки зрения безопасности, труднодоступном и угрожающем облучением, была разработана роботизированная технология, позволяющая выполнять ремонтные работы на стальной оболочке с внутренней стороны биологической защиты. Мощность Билибинской АЭС (48 МВт) — это наименьшая из работающих в мире АЭС в зоне вечной мерзлоты. На ней установлено 4 кипящих графитовых канальных реактора [1].

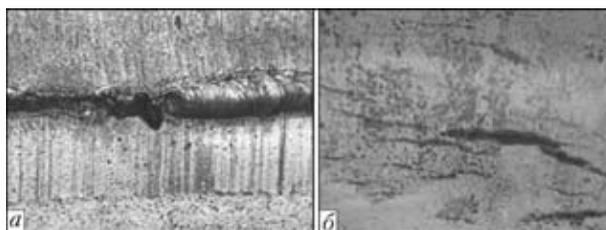


Рис. 3. Виды дефектов: *а* — дефекты соединения в корне сварного шва (труба  $D = 1000$  мм,  $s = 16$  мм); *б* — подобный трещине дефект длиной 1,5...4,0 мм (труба  $D = 10000$  мм,  $s = 14$  мм)



Рис. 4. Внешний вид реактора № 1 Билибинской АЭС [2]



Рис. 5. Опытный стенд из стали S 223 толщиной 20 мм

Отключение реактора Билибино-1, введенного в строй в 1974 г., запланировано на 2019 г. Внутренняя оболочка биологической защиты выполнена из нелегированной стали S 255 (Ст.3) толщиной 20 мм. Была поставлена задача обследовать внутреннюю стенку защитной емкости с точки зрения наличия дефектов, классифицировать их и устранить. Процесс сварки в защитном газе порошковой проволокой был выбран при выполнении ремонта прежде всего потому, что этот способ легко поддается автоматизации. Отремонтированные места должны были гарантировать герметичность. В связи с необходимостью заваривать дефектные места в вынужденных пространственных положениях использовали бесшовную рутиловую порошковую проволоку с быстрозатвердевающим шлаком.

Все применяемые системы, приборы и присадочные материалы нуждались в допуске соответствующих органов атомной энергетики Российской Федерации. Перед началом ремонта проводилась всесторонняя подготовка. Ремонт включал диагностику поверхности на предмет выявления возможных дефектов; определение вида дефектов; подготовку дефектных мест для последующей восстановительной наплавки; выполнение наплавки.

Для предварительных опытов были созданы натурные опытные стенды, позволяющие отрабатывать отдельные этапы работы и определять все необходимые параметры управления (рис. 5).

Для измерения толщины слоя поверхности металла стальной стенки, поврежденной коррозией, применяли электромагнитно-акустический сенсор, функционирующий без контактной жидкости. Для визуального контроля использовали специальные хорошо освещенные камеры.

В рабочей зоне разработан специальный дистанционно управляемый робот (рис. 6), на котором закреплен измерительный и рабочий инструмент. Робот, состоящий примерно из 1000 отдельных деталей, может перемещаться вертикально и горизон-



Рис. 6. Внешний вид робота с электромагнитно-акустическим сенсором (а), инструментом для абразивной зачистки (б) и сварочной горелкой (в)

тально, распознавать и преодолевать различные препятствия, например, усиление в стенке.

Наиболее трудной оказалась задача обеспечения подачи проволоки. Во-первых, порошковую проволоку необходимо транспортировать на расстояние до 20 м, а во-вторых, гарантировать стабильное горение сварочной дуги. В отраслевом институте атомной промышленности всего было сварено и протестировано более 400 образцов.

В результате предложены следующие оптимальные параметры режима сварки: скорость подачи проволоки 2,7...3,5 м/мин; сварочный ток 110...130 А; сварочное напряжение 21 В; скорость сварки 4 см/мин; амплитуда колебания в положении, когда вертикальный угловой шов снизу вверх, 50 мм, в нижнем положении 20 мм; защитный газ M21 (75 % Ar + 25 % CO<sub>2</sub>); усиление шва 2...4 мм; производительность плавления 1,5...2,0 кг/ч.

В связи со специфическим для ведения процесса сварки диаметром сварочным кабелем (диаметр 16 мм<sup>2</sup>) дуга могла гореть только 1,5–2 мин, после чего требовалось охлаждение. На

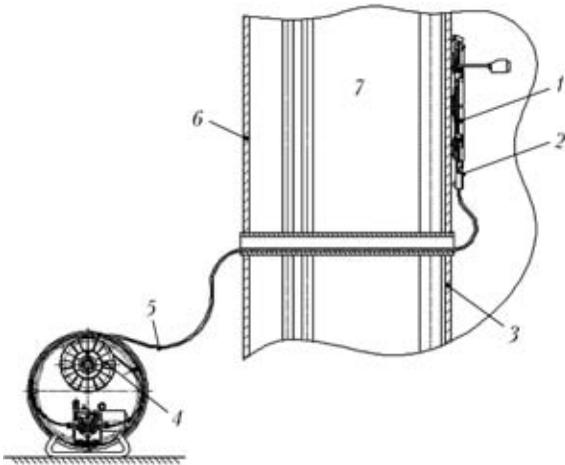


Рис. 7. Схема сварки на внутренней стенке биологического защитного экрана: 1 — ремонтный робот; 2 — приспособление для равномерной подачи проволоки; 3, 6 — соответственно внутренняя и внешняя стальная стенка; 4 — механизм подачи проволоки; 5 — канал для подачи проволоки; 7 — биологическая защита из бетона

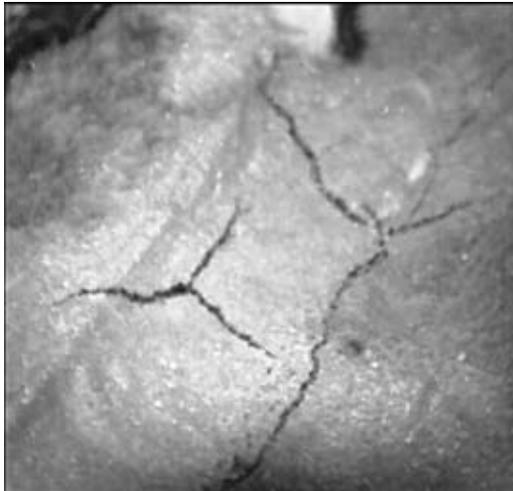


Рис. 8. Внешний вид дефекта № 11 — сеть трещин в соединительном шве между двумя секциями (×2)

рис. 7 схематически представлена рабочая ситуация при ремонте стальной стенки наплавкой.

После подготовительных работ, касающихся в основном последовательности проведения ремонта, систему впервые применили в Билибино. Вначале исследовали внутреннюю стальную стенку. Анализ обнаруженных дефектов показал определенные отклонения от величин, указанных заказчиком при постановке задачи ремонта. Установлено, что вследствие коррозии откололись слои толщиной до 5 мм вместо максимальных 2 мм. Расстояние от биологического защитного экрана до корпуса реактора всего 408 вместо 420 мм. Высота ступеней между отдельными секциями стальных пластин на внутренней стенке достигала вместо 10 до 18 мм. Кроме того, в шлюзовой зоне робота обнаружены не указанные в документации трубочки для термопар. Все приведенные отличия требовали обязательной адаптации используемой



Рис. 9. Устраненные наплавкой дефекты на внутренней стальной оболочке (выделенный участок поверхности, где переварена сеть трещин, показанная на рис. 8)

техники. По этой причине дополнительно возник показанный на рис. 6, б робот с инструментом для абразивной зачистки. Скорость зачистки поверхности этой системой была значительно увеличена. Кроме того, после сварки появилась возможность очистить поверхность от шлака и остатков проволоки, приставших при зажигании, что повышает герметичность наплавленных участков. При первой зачистке поверхности внутренней стенки биологической защиты (2,5 м<sup>2</sup>) система выявила 21 дефект. Поскольку при любой технологии диагностическая система без абразивной зачистки не могла обнаружить десятки поверхностных дефектов, явно видно преимущество усовершенствованной системы очистки. Трещины, обнаруженные в сварном шве между двумя секциями внутренней стальной стенки (рис. 8), можно устранить наплавкой. Поскольку после первого слоя наплавки дефект не был полностью устранен, то процесс следовало повторить. При этом применили новую концепцию абразивной зачистки поверхности.

Поверхности пораженного участка после сварки, представленного на рис. 9, были устранены с помощью наплавки.

В октябре 2010 г. отдел концерна «РОСАТОМ», ответственный за эксплуатацию установки в Билибино, провел приемку ремонтных работ и запустил реактор.

## Выводы

1. Создана универсальная роботизированная система небольших размеров, которая может перемещаться в принудительном положении в замкну-

том пространстве под воздействием радиоактивного излучения. Эта система может применяться для диагностики, измерения толщины стенки, визуального контроля, сварки или наплавки с целью обеспечения герметичных соединений, выполнения работ по зачистке поверхности от шлака, коррозионных повреждений или краски.

2. С помощью разработанной системы осуществляется зачистка поверхности внутренней стальной стенки биологического защитного экрана пло-

щадью 2,5 м<sup>2</sup>. При этом выявлено 10 или более трещин, которые можно подвергать ремонту.

3. Разработана технология исправления трещин и герметизации поврежденных мест путем одно- или многослойной наплавки.

4. Приобретенный при ремонте опыт послужит основанием для дальнейших работ по обеспечению безопасности Билибинской АЭС, а также других АЭС концерна «РОСАТОМ».

1. <http://atomas.ru/rosatom/safety-gp.html>.

2. <http://atomas.ru/rosatom/bilibino.html>.

There exists a multitude of cases of breakdown of parts of components or complete systems because of untimely detection of their failure. Shown is the possibility of complex repair solutions in safety-critical cases, including difficult-of-access zones of industrial plants in Russia. These are complex automated and partially remotely controlled systems made in Russia and applied in the field of gas and power engineering.

Поступила в редакцию 05.04.2012

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ЛОКАЛЬНОГО УКРЕПЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

*Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — академик НАН Украины К. А. Ющенко).*

*Обоснован выбор перспективных износостойчивых материалов для локального укрепления контактных поверхностей лопаток. Изготовлены исследуемые материалы на базе никелевых жаропрочных сплавов ЖС32 и IN738, содержащие 30 об. % Ti (19 мас. %) в виде слитков и порошковых композиций, полученных механическим легированием.*

*С помощью методов электроискрового нанесения покрытий, микроплазменной наплавки и реакционно-диффузионной сварки испытана технология локального нанесения материалов для укрепления контактных поверхностей лопаток.*

*Металлографические исследования полученных сплавов и образцов наплавленного металла из исследуемых износостойчивых материалов указывают на равномерное распределение упрочняющей карбидной фазы TiC в основной матрице, имеющей размеры в пределах 0,2...30 мкм. Следует ожидать увеличения контактной износостойчивости новых материалов в 1,5...2 раза по сравнению с серийными технологиями и материалами.*