

тель моста, а изготовитель алюминия. В настоящее время этот процесс для строительства мостов применяется ограничено. На рис. 6, б представлена концепция использования лазерной сварки для получения коробчатой фермы моста. Этот способ сварки для строительства мостов применяется ограничено. Лазерная сварка позволяет получать большие блоки мостов без трудоемких операций кантования, которая необходима при дуговой сварке. Кроме того, предполагается, что лазерная сварка ребер жесткости будет способствовать повышению их временного сопротивления.

Таким образом, в настоящей работе изложены последние тенденции применения сварочных технологий при проектировании и изготовлении в Японии стальных конструкций таких, как корабли и мосты. Рассмотрено также применение для этих целей новых процессов сварки (лазерной и трением с перемешиванием). Следует отметить, что сталь высокого качества, предлагаемая японскими сталеплавильщиками, помогает изготовителям стальных конструкций обеспечивать высокие эксплуатационные характеристики их продукции,

In this paper, a trend of welding technologies in design and manufacture of steel structures, such as ships and bridges, is reviewed. Further, the recent advance in welding atomization and application of new welding processes, such as laser and friction stir welding, in the Japanese industries is presented.

что способствует дальнейшему прогрессу в области разработок производственных технологий в Японии, и хотя данный обзор ограничен рассмотрением строительства кораблей и мостов, авторы надеются, что настоящая работа будет полезна для специалистов других сфер.

1. *Sugitani Y.* The technical trends and the future perspective of the shipbuilding industries in Japan: NKK technical reports.
2. *Suga T.* Welding consumables // J. of JWS. — 1998. — **67**, № 8.
3. *Koga S.* The history of manufacturing — ships // Ibid. — 2000. — **69**, № 8.
4. *Yurioka N.* Welding of TMCP steel // Ibid. — 1992. — **61**, № 4.
5. *Shiga C.* Progress of weldable tough high-strength steel // Ibid. — 1996. — **65**, № 3.
6. *SR 193* Research Committee: Research on effective use of newly developed high strength steel of a HT50 class / Japan Shipbuilding Research Institute. — 1983–1985.
7. *Steve's* marine disaster pages, the «MSC CAPLA». — 2003.
8. *Battle ships in the world.* — 2005. — № 640.
9. *Hitachi Ltd.* Technical Report.
10. *Application of laser welding techniques to railway vehicles / A. Hara et al.* // Forum on laser material processing 2006.
11. *News report on TSL // The Ogasawara news.*
12. *Light Metal Welding.* — 2008. — **46**, № 1.

Поступила в редакцию 23.02.2008

УДК 621.791.052-192;621.791:658.562]:311

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ — ОСНОВНОЙ ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Академик РАН **Н. П. АЛЕШИН** (НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ)

Диагностика является неотъемлемой частью технологического процесса при производстве материалов и изделий. Наличие высококачественных материалов и технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует безаварийной эксплуатации. Изложены процедура и средства технического освидетельствования различных объектов, разработанных в НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, сварные конструкции, остаточный ресурс, техническое освидетельствование, дефектоскопическое оборудование, методики расчета

По данным США, стоимость контрольных операций при производстве изделий военно-промышленного комплекса достигает 25...35 % общей стоимости изделий. В строительной индустрии эти затраты составляют 10...12 %. В России затраты на контроль и диагностику, как правило, ниже в 15...20 раз.

В настоящее время значение неразрушающих методов контроля и диагностики особенно велико, поскольку изношенность парка технологического оборудования в отдельных случаях превышает 65 %. В ближайшее время для предотвращения аварий необходимо создать технологии и оборудование для оценки остаточного ресурса наиболее опасных эксплуатируемых объектов. Решению этой проблемы большое внимание уделяют как за рубежом (Германия, Украина, Китай и др.), так и в России.

В России получены хорошие результаты и в части создания высокоинформативного дефектос-

© Н. П. Алешин, 2008

копического оборудования, и в разработке методик расчета остаточного ресурса отдельных объектов. Созданные приборы и инструменты основаны на последних достижениях в области ультразвуковой дефектоскопии, информатики, радиоэлектроники и по своим эксплуатационным характеристикам не уступают лучшим мировым образцам.

В данной статье изложены процедура и средства технического освидетельствования различных объектов, разработанных в НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Для того чтобы рассчитать остаточный ресурс трубопровода необходимо иметь по меньшей мере 34...37 параметров. Основные из этих показателей приведены в табл. 1. Видно, что данные по разделам 1 и 3 (за исключением п. 3.3) можно получить у проектировщиков и эксплуатационников. Характеристики по разделу 2 и п. 3.3 получают с использованием оборудования для неразрушающего контроля.

При оценке технического состояния крупногабаритных объектов (сосуды, газгольдеры, резервуары и пр.), а также объектов с большой разветвленностью трубопроводов (компрессорные станции) провести 100 % неразрушающий контроль представляется сложным и дорогостоящим мероприятием (рис. 1). Для обследования изделий подобного типа на первом этапе применяется акустоэмиссионная (АЭ) диагностика.

Методология АЭ диагностики, разработанная в МГТУ им. Н. Э. Баумана, базируется на применении новых комплексных энергетических параметров АЭ спектрального и регрессионного сигнала (рис. 2), а также на использовании отдельных волновых компонент для идентификации типа дефекта, оценки степени его развития и стадии предразрушения конструкции от развивающейся трещины. Возможна АЭ диагностика механизма пластической деформации микро- и макротрещинообразования, различных видов коррозии и коррозионного растрескивания.

Векторно-энергетический анализ и экспериментальные исследования распределения плотности потока энергии, мощности АЭ и их энергетических спектров для продольной, поперечной волн и суммарного поля вокруг трещины показали перспективность АЭ дефектоскопии, основанной на регистрации отдельных волновых компонент. Для исследованных объектов установлена идентичность энергетического спектра для продольной, поперечной волн и суммарного поля АЭ от единого источника возмущения (деформирования путем скользяния, развития трещин). Выявлена линейная зависимость между механической энергией деформирования и акустической энергией суммарного поля, а также продольной и поперечной волн. Показано, что распределение энергии суммарного поля АЭ и отдельных его компонент вокруг вершины трещины подобно конфигурации зоны пластической деформации. Оказалось эффективным использование для идентификации источников АЭ вероятностных областей признаков диагностируемых процессов (ис-

Т а б л и ц а 1. Исходные данные, необходимые для определения остаточного ресурса сварных конструкций при наличии дефектов

1. Данные об исследуемом объекте
1.1. Тип и габариты сварной конструкции
1.2. Химический состав основного металла и сварного шва
1.3. Характер и значение рабочей нагрузки
1.4. Условия эксплуатации (окружающая среда, температура)
1.5. Действующий срок эксплуатации
2. Данные о выявленных дефектах
2.1. Тип дефекта (поверхностный, внутренний, плоскостной, объемный)
2.2. Место расположения (основной металл, шов, зона термического влияния)
2.3. Размеры и глубина залегания от поверхности изделия
2.4. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне дефекта
3. Данные о свойствах материала в зоне дефекта
3.1. Исходные механические свойства и измеренные прибором
3.2. Критерий трещиностойкости (K_{IC} , K_{Ih}) и предельная пластичность (ϵ_i пред)
3.3. Степень ухудшения (деградации) свойств материалов в процессе эксплуатации

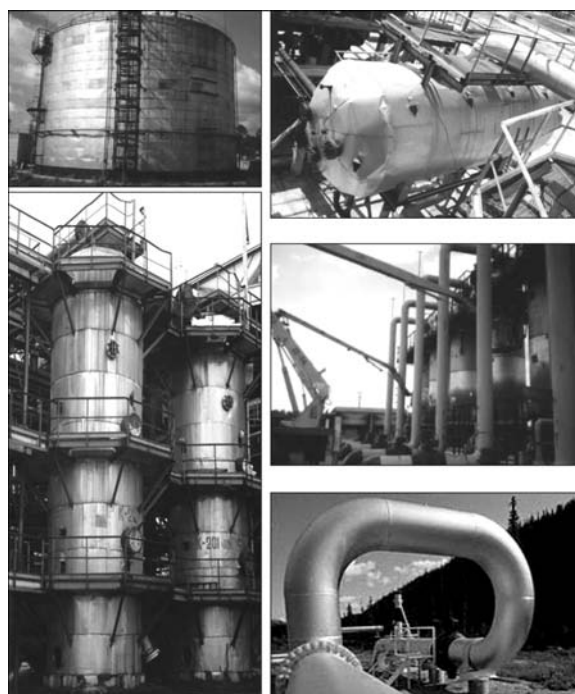


Рис. 1. Объекты обследований

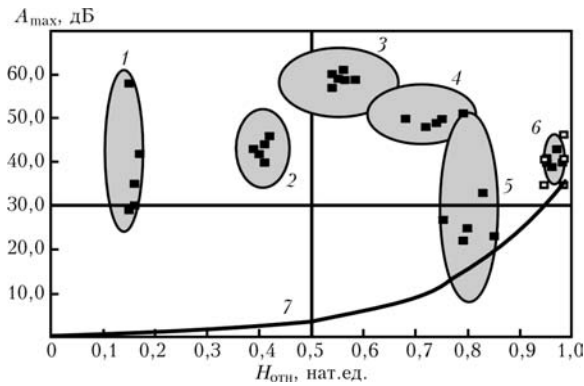


Рис. 2. Результаты АЭ испытаний крупногабаритных образцов на диагностической диаграмме: 1 — нестабильная трещина, непровар; 2 — подрастающая трещина; 3 — развивающееся расслоение; 4 — множественные объемные дефекты; 5 — пластическая деформация, стабильная трещина; 6 — коррозионное растрескивание; 7 — уровень бездефектности

точников АЭ), построенных путем статической обработки параметров потока сигналов АЭ.

Так, при использовании эллипсов рассеяния (средняя энергия сигналов и медианная частота) как информативных признаков идентификация пластической деформации и развивающейся микротрещины по этой методике осуществляется с высокой достоверностью. Погрешность классификации микротрещины на фоне пластической деформации составила 3 %.

Научные и методические разработки были положены в основу создания 16-канальной АЭ измерительной системы АЭИС, обеспечивающей в реальном масштабе времени локализацию, идентификацию и оценку степени опасности развивающегося дефекта.

При оценке технического состояния магистральных трубопроводов принята следующая процедура. После 100 % внутритрубной диагностики устанавливаются наиболее потенциально опасные места трубопровода за исключением сварных стыков.

Поскольку внутритрубная диагностика не обеспечивает точной инструментальной оценки размеров выявленных в теле трубы и практически не обнаруживает дефекты в сварных швах, то трубопроводы подвергают дополнительному обследованию. Для этого его освобождают от земли и вывешивают на специальные тумбы. С этой целью применяют автоматизированную ультразвуковую установку «Автокон-МГТУ», разработанную в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Автономная роботизированная система представляет собой механизм передвижения, несущий 8-канальный ультразвуковой дефектоскоп с управляющим процессором и акустическую систему. Пульт управления имеет экран для слежения за процессом контроля и кнопки управления установкой. Результаты контроля запоминаются процессором (до 300 м сварного шва) с последующей перепиской на компьютер для дальней-

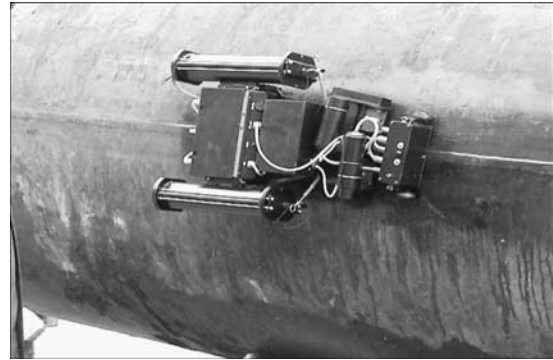


Рис. 3. Дефектоскопия тела трубы установкой «Автокон-МГТУ»

шей распечатки и создания базы данных. Система устанавливается на контролируемом изделии и перемещается вдоль сварного стыка, автоматически отслеживая его без каких-либо дополнительных приспособлений. Механизм сканирования удерживается на поверхности трубы встроенными в колеса постоянными магнитами. Установка малогабаритна, проста в эксплуатации, обслуживается двумя операторами. Ее сравнительные характеристики приведены в табл. 2.

При дефектоскопии тела трубы установка «Автокон-МГТУ» (далее сканер) благодаря наличию высокоточного датчика слежения за швом движется со скоростью 2 м/мин вдоль продольного шва (рис. 3). В случае отсутствия доступа к продольному шву вдоль образующей трубы прикрепляется гибкая лента (рулетка), которая служит направляющей для перемещения сканера. Результаты дефектоскопии заносятся в память компьютера и распечатываются в лаборатории (рис. 4). При дефектоскопии кольцевых стыков труб сканер перемещается по периметру вдоль шва (рис. 5). Опытная эксплуатация сканера (проконтролировано более 400 км) различного типоразмера труб 1620...1420 мм с толщиной стенки 8...20 мм показала высокую выявляемость (около 97 %) практически всех типов несплошностей в теле трубы. Достоверность обнаружения дефектов в кольцевых стыках труб составила более 85 %.

Следует заметить, что существующий лучший зарубежный аналог «Pipe WIZARD-PA» фирмы RTD может контролировать только кольцевые стыки (рис. 6) и требует наличия специализированного транспорта с дизельным генератором.

Существенным недостатком контактных сканеров является необходимость специальной трудоемкой подготовки поверхности и подачи в зоне контакта специальной жидкости. Для исключения этого недостатка в НУЦ «Сварка и контроль» совместно с НПО «ИНТРОТЕСТ» разработан и опробован на реальных объектах бесконтактный электромагнитный акустический автоматизированный сканер (рис. 7). Испытания показали высокую чувствительность (~ 0,1T) к внутренним и

Таблица 2. Сравнительные характеристики систем Pipe WIZARD-PA (RD TECH™) и «Автокон-МГТУ»

Параметр или характеристика	Система «Pipe WIZARD-PA»	Система «Автокон-МГТУ»	Примечание
Автономность системы	В пределах длины кабеля связи перемещаемого блока и шланга для подачи контактной жидкости	Полная	При контроле трубопроводов основной блок Pipe WIZARD-PA необходимо размещать на автомобиле, а длина кабеля и шланга должна быть не менее 20 м
Способ сканирования	Автоматический, вдоль направляющей, устанавливаемой на сварной шов	Автоматический, без дополнительных приспособлений	Автокон – МГТУ снабжен датчиком слежения за валиком усиления шва или гибкой лентой
Масса	Более 50 кг без учета массы внешнего компьютера, сосуда с контактной жидкостью, шлангов и кабелей	Не более 18 кг	Pipe WIZARD-PA не может транспортироваться вручную
Диапазон контролируемых толщин основного металла трубопровода	От 7 до 32 мм	От 6 до 35 мм при замене акустических блоков	В основном толщина основного металла трубопроводов не менее 8 и не более 30 мм
Диапазон рабочих температур	От –15 до +30 °С	От –40 до +50 °С	Контролировать чаще всего приходится зимой, т. е. при отрицательных температурах
Основные результаты контроля	Обнаружение дефектов, определение их местоположения и измерение условных размеров	Обнаружение дефектов, определение их местоположения и измерение условных размеров	—
Функция слежения за акустическим контактом	Да, отдельный преобразователь по отражению от внутренней поверхности трубы	Да, при каждом запуске каждого канала без использования дополнительной аппаратуры	—
Объем контроля	Кольцевые швы	Кольцевые и продольные швы, тело трубы	—

наружным дефектам в сварном шве и теле трубы. Следует отметить, что разработанный сканер не имеет аналогов.

При оценке качества сварных соединений трудноконтролируемых изделий АЭС наиболее эффективными оказались системы типа «Авгур»,

использующие когерентные методы обработки сигналов (рис. 8), разработанные в НПО «Эхо+» под руководством проф. А. Х. Вopilкина.

Системы, использующие когерентные методы визуализации дефектов, имеют принципиальное преимущество перед традиционными дефектоскопами: они используют значительно больше информации о дефекте, что позволяет получать изображения с очень высоким разрешением — порядка длины используемой звуковой волны, высоким отношением сигнал — шум, хорошо воспроизводимые при повторном контроле. Эти изображения в значительно большей степени зависят от фазовых составляющих измеренного акустического поля, рассеянного дефектами, чем от его амплитуды.

На АЭС с реакторами типа РБМК наибольший объем контроля пришелся на сварные соединения трубопроводов Ду 300. Эти трубопроводы изготовлены из труб стали 08X18H10T с номинальными значениями наружного диаметра — 325 мм и толщины стенки — 12...18 мм.

Наиболее характерными дефектами в этих сварных швах, возникающими в процессе эксплуатации, являются продольно и поперечно ориентированные поверхностные трещины, образованные по механизму межкристаллитного растрескивания под напряжением. Контроль выполнялся

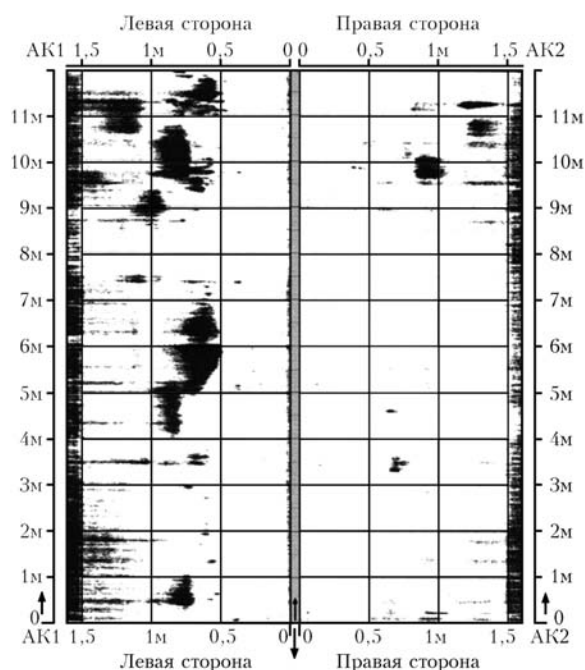


Рис. 4. Ультразвукограмма тела трубы

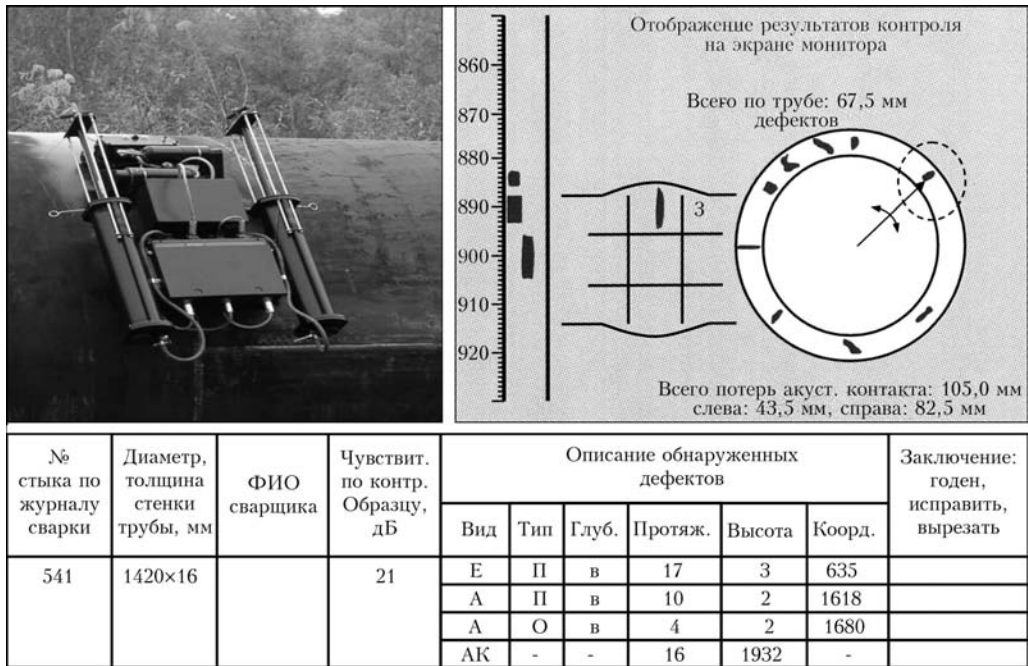


Рис. 5. Дефектоскопия кольцевых стыков труб

с применением систем серии «Авгур» и использованием кольцевого сканера (рис. 8, а).

Для сварных соединений Ду 1200 реактора ВВЭР-1000 характерным является большая толщина (72 мм) и наличие галтели, от которой чаще всего зарождаются трещины в процессе эксплуатации.

На рис. 9 хорошо видна диагональная поперечная трещина на фоне сигналов от корня и галтели. На основании полученных данных было составлено заключение контроля, содержащее данные о размерах, местоположении и ориентации дефекта. Результаты последующего вскрытия подтвердили точность определенных параметров.

При продлении эксплуатационного ресурса парогенераторов АЭС с реакторными установками ВВЭР-440 особенно актуальной становится задача обеспечения достоверной диагностики композитного сварного соединения переходного кольца и патрубка Ду 1100 парогенераторов (рис. 10). Сложность решения этой задачи обусловлена ис-

пользованием толстостенных аустенитных материалов, переходных электродов. Кроме того, при проектировании этого сварного соединения не предусматривалась возможность проведения его эксплуатационного контроля. При разработке методики контроля этого сварного соединения необходимо было обеспечить достоверность диагностики на современном уровне. Это достигается использованием системы автоматизированного ультразвукового контроля серии «Авгур», обеспечивающей запись и долговременное хранение результатов контроля, а также использующей различные методы обработки и представления данных контроля. Эта аппаратура позволяет выявлять дефекты в сварном соединении с определением их геометрических размеров и координат залегания.

На рис. 11 приведен пример изображения продольной трещины (когерентные изображения В, С, D типов), полученной в режиме измерительного контроля. Дефект локализован на границе основной металл — двухслойная наплавка. Изображение получено при использовании ПЭП про-



Рис. 6. Сканер «Pipe WIZARD-PA» фирмы RTD



Рис. 7. Электромагнитный акустический дефектоскоп-сканер для контроля основного металла труб газопроводов

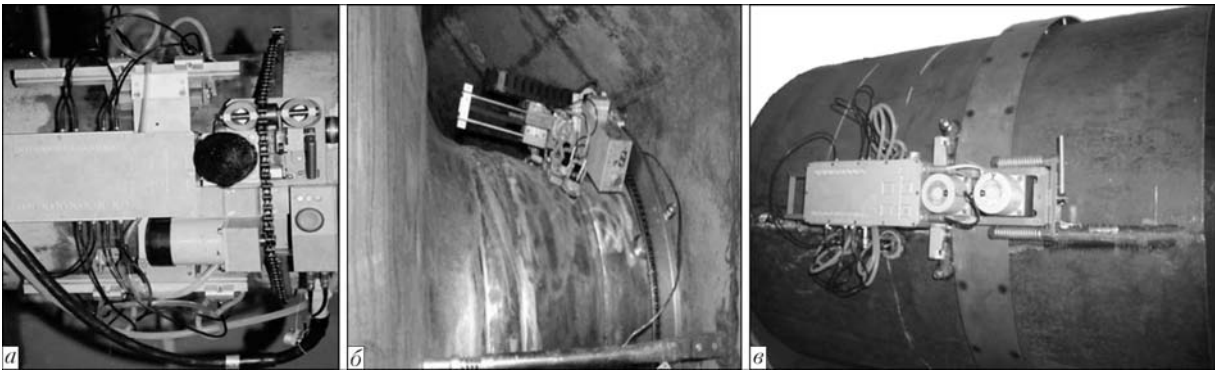


Рис. 8. Сканеры систем серии «Авгур 5», предназначенные для контроля трубопроводов Ду 300 на объекте контроля (а), патрубков Ду 500 корпуса реактора на объекте контроля (б), трубы на трубопроводе Ду 800 (в)

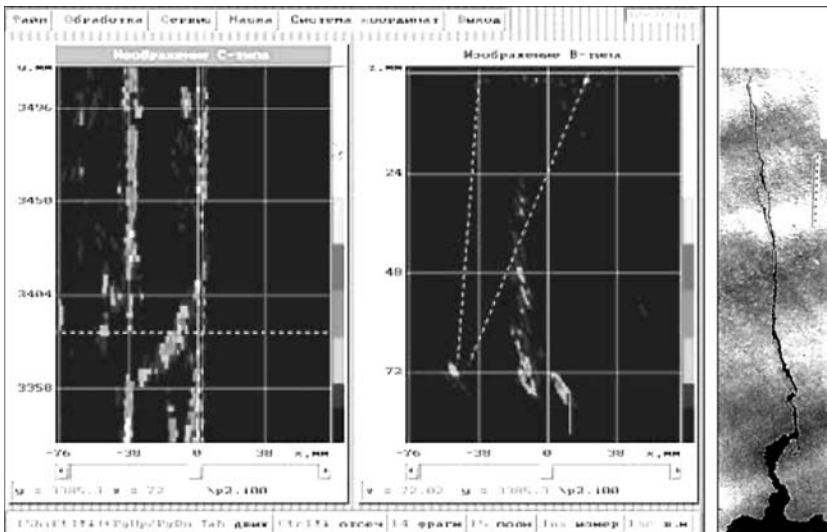


Рис. 9. Изображение дефекта в сварном соединении № 111 (углом ввода ПЭП 40°)

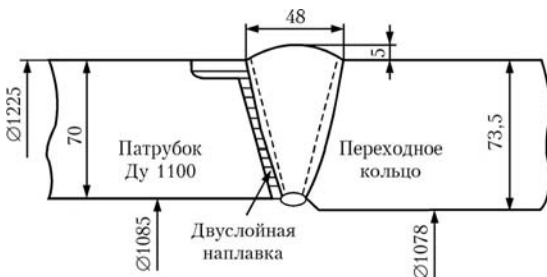


Рис. 10. Эскиз композитного сварного соединения переходного кольца и патрубка Ду 1100 парогенераторов реакторной установки ВВЭР-440

дольных волн, облучающих сварное соединение со стороны патрубка Ду 1100.

При обследовании труднодоступных конструкций, в которых по результатам АЭ диагностики зафиксированы потенциально опасные места, а также для более точной оценки параметров дефектов, обнаруженных в сварном шве и теле трубы, применяют ультразвуковой дефектоскоп-томограф СК-РДМ, разработанный НУЦ «Сварка и контроль» совместно с фирмой РДМ (г. Кишинев) (рис. 12). Данный прибор с высокой точностью определяет размеры конфигурации и координаты дефектов. Следует отметить, что в нем наиболее удачно реализована идея А. К. Гурвича за качеством слежения акустического контакта. Наличие

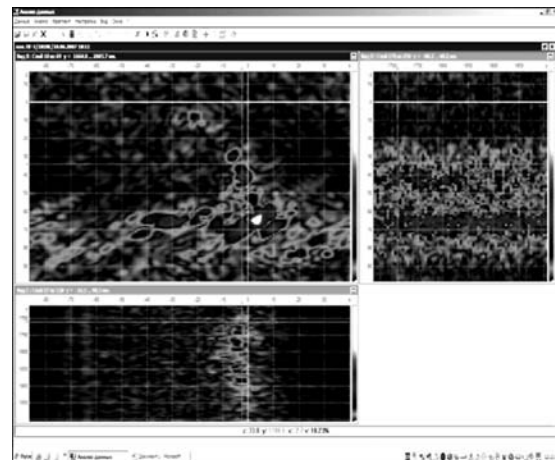


Рис. 11. Когерентное изображение плоскостного дефекта, полученное по данным измерительного контроля с использованием продольных волн

в составе прибора удобного 3-мерного ультразвукового датчика положения преобразователя позволяет обеспечить заданную методикой траекторию сканирования объекта, восстанавливать 2- и 3-мерные томографические изображения дефектов.

Автоматическая расшифровка результатов осуществляется в реальном масштабе времени. Благодаря мультипрограммной организации СК-

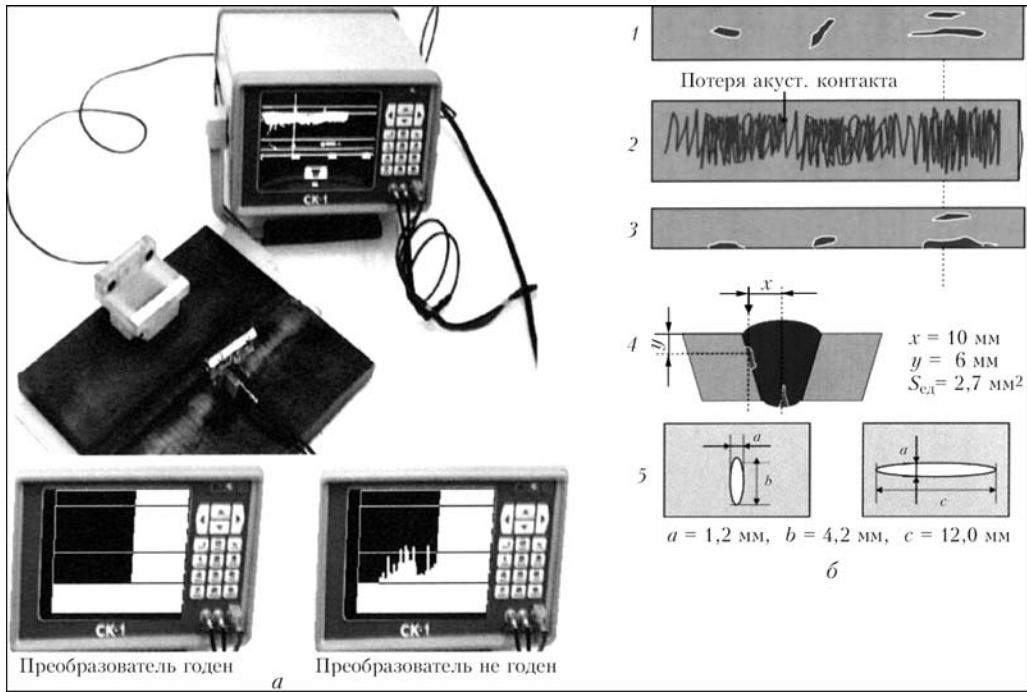


Рис. 12. Мультипрограммный портативный ультразвуковой дефектоскоп СК-РДМ: а — самоконтроль системы; б — информация о дефекте; 1 — вид сверху; 2 — след сканирования; 3 — продольное сечение шва; 4 — поперечное сечение шва; 5 — томографическое изображение дефекта



Рис. 13. Портативная спектрально-акустическая система контроля механических напряжений «Астрон»

РДМ может содержать до восьми независимых виртуальных специализированных приборов ультразвукового контроля, в том числе для контроля аустенитных сварных соединений с автоматическим учетом особенностей распространения ультразвуковых колебаний в кристаллитной структуре сварного шва. В комплекте с СК-РДМ поставляется специальная программа, предназначенная для приема результатов контроля, представления этих результатов в удобной и легко читаемой форме, ведения электронных баз данных и получения информации о качестве изделия.

Для оценки уровня работоспособности объекта не всегда достаточно знать форму, размеры и координаты дефектов. Значительное влияние на уровень НДС оказывает наличие остаточных напря-

жений в различных элементах конструкций в первую очередь в зоне дефектов.

Известно множество приборов для оценки остаточных напряжений, основанных на измерении различных характеристик магнитных, электромагнитных или ультразвуковых полей. Общим их недостатком являются низкая точность измерения (20...25 %). В НУЦ «Сварка и контроль» МГТУ им. Н. Э. Баумана совместно с ООО «Интеллект» (г. Н. Новгород) был разработан образец автоматизированной акустической системы «Астрон» (рис. 13), предназначенной для оценки структурных и прочностных характеристик материалов. Работа системы основана на анализе связи между параметрами спектров импульсов упругих волн, распространяющихся в исследуемом материале, и его физико-механическими и структурными характеристиками.

В материал исследуемой детали или элемента конструкции излучаются упругие широкополосные акустические импульсы. Центральная частота спектра выбирается в диапазоне 1...15 МГц в зависимости от типа материала. В зависимости от толщины исследуемого материала для анализа используют либо объемные, либо неоднородные волны, которые по сравнению с известными типами волн имеют в 10...12 раз более высокую чувствительность. При распространении акустического импульса он взаимодействует с основными компонентами структуры материала — зернами, микротрещинами, микропорами, внутренними напряжениями, которые влияют на спектр сигнала. В процессе проведения комплекса обу-



Рис. 14. Измерение уровня механических напряжений в теле трубы при шурфовом обследовании газопровода-отвода

чающих экспериментов устанавливаются корреляционные или функциональные связи между спектрально-акустическими параметрами и структурно-механическими характеристиками материала предполагаемого объекта обследования. В основу измерительного алгоритма положен способ определения временных задержек, фигурирующих в уравнениях, связывающих скорости распространения упругих волн с действующими упругими напряжениями. Выбираются два импульса, прошедшие различные акустические пути. Задержка, используемая в алгоритме акустоупругости, рассчитывается по формуле

$$\tau = \tau_0 - \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^k \frac{1}{f_i} [\arctg[B_2(f_i)/A_2(f_i)] - \arctg[B_1(f_i)/A_1(f_i)]], \quad (1)$$

где τ_0 — задержка переднего фронта второго анализируемого импульса; A , B — соответственно синусный и косинусный члены фурье-преобразования; f_i — i -я спектральная частота из выбранного информативного частотного диапазона; K — общее число спектральных частот.

Для определения напряжения в исследуемом объекте измеряют необходимые задержки, извлекают из базы данных напряжения в соответствии с установленными ранее акустоупругими зависимостями.

Промышленное применение системы «Астрон» показало ее высокую эффективность при обследовании конструкций, материал которых имеет низкую степень анизотропии, например, сталь 17Г1С.

Для изделий из анизотропных материалов (например, аустенитные стали) наиболее эффективным методом неразрушающего контроля является метод рентгеновской дифрактометрии, основанный на зависимости закона дифракции и закона Гука. Метод базируется на эксперименталь-

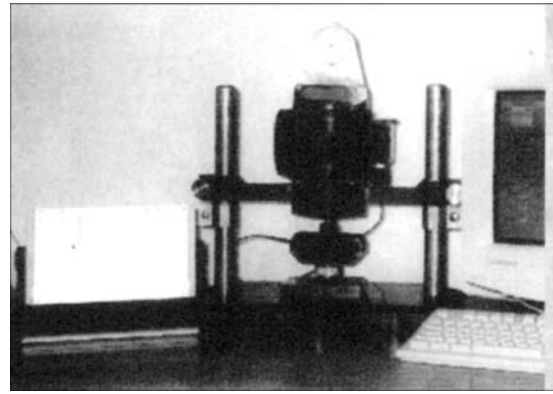


Рис. 15. Прибор ПИМ-ДВ1

ном измерении деформации кристаллической решетки ε_1 совокупности зерен контролируемого металла, т. е. на измерении деформации кристаллической решетки $\Delta d_i/d_i$ в заданном направлении.

Значения межплоскостных расстояний d_i связаны с углом дифракции θ и длиной волны λ используемого монохроматического излучения законом дифракции

$$2d \sin \theta = \lambda. \quad (2)$$

Деформацию в данном направлении, равную относительному изменению межплоскостных расстояний, можно определить по изменению угла дифракции, если продифференцировать соотношение (2):

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta d_i}{d_i} = -\operatorname{ctg} \theta \Delta \theta_i. \quad (3)$$

Используя уравнения закона Гука для плосконапряженного состояния, что соблюдается для приповерхностных слоев (10...30 мкм от поверхности для сталей) в пределах глубины проникновения «мягких» рентгеновских лучей, получаем уравнение для определения напряжений σ_φ в азимутальном направлении φ

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{1 + \nu} \operatorname{ctg} \theta (\theta_{\varphi, \psi=0^\circ} - \theta_{\varphi, \psi=90^\circ}), \quad (4)$$

где E — модуль Юнга материала; ν — коэффициент Пуассона; ψ — полярный угол между нормалью к поверхности объекта и нормалью к отражающим плоскостям (задается конструкцией коллиматора тензометра).

Соответствие «механических» и «рентгеновских» макронапряжений (или напряжений I рода) соблюдается для всех изотропных мелкозернистых (с размером зерна 0,1...30 мкм) материалов при условии выполнения закона Гука. Определяются истинные действующие или остаточные микронапряжения в поликристаллических металлах и керамиках вплоть до предела прочности.

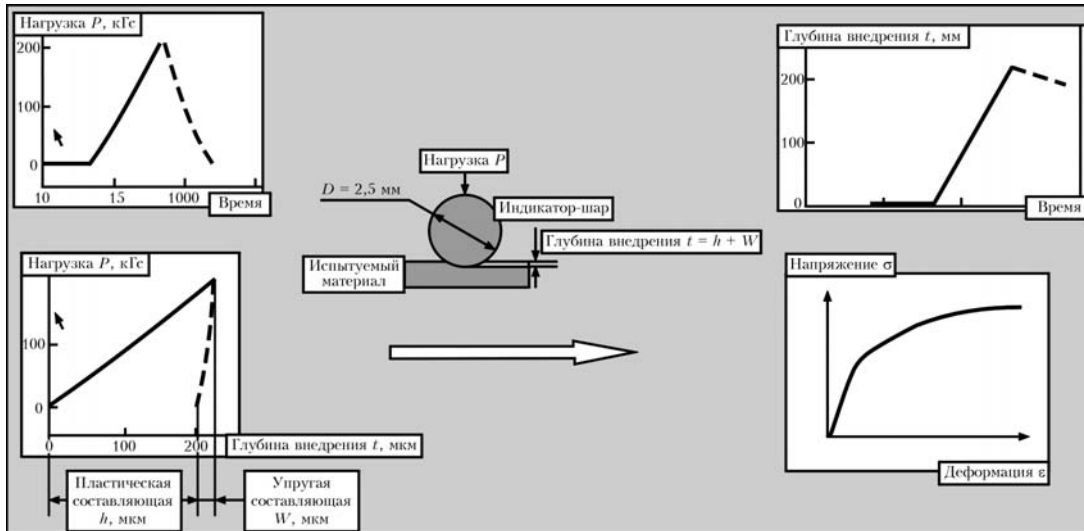


Рис. 16. Схема определения механических свойств материала на основе метода регистрации диаграммы упругопластического вдавливания сферического индентора

Одним из наиболее совершенных рентгеновских дифрактометров является аппарат фирмы НПЦ «Молния», созданный под руководством проф. В. В. Кононова (рис. 14).

В МГТУ им. Н. Э. Баумана проф. Э. Л. Макаровым и проф. А. С. Куркиным разработан расчетный метод определения НДС для металлов с хрупким ($K_{IC} \leq 120$ МПа) и вязкохрупким разрушением ($K_{IC} > 120$ МПа). Для первой группы металлов расчет НДС проводится методами линейной механики разрушения, для второй группы используется критерий предельной пластичности $\delta_{пред}$. На заключительном этапе оценки ресурса конструкции необходимо получить реальную картину физико-механических свойств металла (деградация) за счет старения материала. С этой целью используется прибор ПИМ-ДВ1, разработанный в НПО «Роботест» (рис. 15). Прибор регистрирует в режиме реального времени диаграммы локального упругопластического деформирования материала в координатах: нагрузка–время, перемещение–время и нагрузка–перемещение при непрерывном вдавливании сферического индентора (рис. 16).

Результаты современных теоретических и экспериментальных исследований процесса упругопластического вдавливания сферического индентора позволили установить ранее неизвестные закономерности контактного деформирования, получить универсальные и надежные критерии упрочнения и пластической деформации при вдавливании, найти условия физического подобия деформированного состояния разных материалов под индентором,

Diagnostics is an integral part of the technological process in manufacturing materials and products. Availability of high-quality materials and technologies of structure fabrication in the absence of effective diagnostic methods does not guarantee safe operation. Procedure and means of technical examination of various objects developed at ETC «Welding and Inspection» at the N.E. Bauman MSTU, are described.

предложить определяющие соотношения между силовыми и деформационными параметрами диаграмм вдавливания и растяжения.

На базе этого для углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей в различных структурных состояниях, а также для цветных металлов и сплавов были разработаны методики определения следующих механических свойств: предела текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления σ_b , кривой упрочнения, равномерной деформации, относительного удлинения δ и относительного сужения ψ , включая характеристики твердости по Бринеллю HB , Виккерсу HV и Роквеллу HRC .

Данные по разделам 1, 2 и 3 (см. табл. 1) заносятся в программный комплекс «Ресурс», в котором имеется также банк данных критериев трещиностойкости, параметры уравнения скорости роста усталостных трещин (ϵ_{ic}). Этот комплекс включает также данные по свойствам материалов сварных конструкций. Наряду с числовыми данными банк включает регрессионные модели для прогнозирования отсутствующих критериев трещиностойкости в зависимости от химического и фазового состава.

Многолетний опыт нашего центра позволил разработать «Правила оценки ресурса сварных магистральных газопроводов по результатам текущего контроля» и провести их экспериментальную проверку. Установлена высокая сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Поступила в редакцию 09.04.2008