



ОПЫТ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ В ОБЛАСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **А. Я НЕДОСЕКА**,
С. А. НЕДОСЕКА, д-ра техн. наук, **А. А. ГРУЗД**, **М. А. ЯРЕМЕНКО**, кандидаты техн. наук
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены основные результаты исследований и разработок в области создания технологии контроля на основе акустической эмиссии (АЭ), выполненных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины с 1963 г. по настоящее время. Показано применение технологии АЭ контроля в промышленности. Освещены вопросы создания нормативной базы и подготовки специалистов в области АЭ контроля. Рассмотрены перспективы развития данного направления с учетом общемировых тенденций.

The paper presents the main results of research and development in the field creation of inspection technology based on acoustic mission (AE) performed at the E.O.Paton Institute since 1963 up to now. Application of AE inspection technology in industry is shown. Questions of compiling the normative base and training specialists on AE inspection are highlighted. Prospects for development of this field taking into account the global tendencies are considered.

Сегодня метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее эффективных и широко используемых средств диагностики состояния материалов промышленных конструкций. Уникальность метода состоит в том, что, с одной стороны, он не требует внешнего источника возбуждения для получения данных о состоянии материалов, с другой — позволяет получать информацию о дефектах на значительном удалении от них. Развитие дефектов служит источником акустических волн, которые распространяются в материале на значительные расстояния, а их локация несколькими датчиками позволяет определить местонахождение опасного участка.

Анализ параметров зарегистрированных приборами акустических сигналов во многих случаях дает возможность оценить опасность процессов, происходящих в деформируемом материале, и спрогнозировать разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкции.

Это позволяет превращать конструкции в интеллектуальные устройства, собирающие информацию о своем состоянии и оценивающие его в реальном режиме времени, обеспечивая, таким образом, свою безопасность. Современная компьютерная техника, технологии Интернета, сетевой и беспроводной связи делают реальным дистанционный доступ к диагностической информации, позволяют анализировать и обобщать получаемые данные в рамках сетей промышленных предприятий и целых отраслей.

Технология автоматизированного АЭ контроля, которая актуальна сегодня и имеет серьезные перспективы использования в будущем, внедрена и работает на ряде промышленных предприятий Украины, внося свой вклад в обеспечение надеж-

ной эксплуатации потенциально опасных объектов народного хозяйства. Такой результат был бы невозможен без длительных научных и инженерных разработок, в частности, проводимых в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) уже более 40 лет.

Краткая история. В 1963 г. при ИЭС был создан Научный совет «Новые процессы сварки и сварные конструкции» Государственного комитета СССР по науке и технике, положивший начало работам по созданию теории и методов прогнозирования работоспособности конструкций. При секции Научного совета «Сварные конструкции» была создана рабочая группа № 3 «Техническая диагностика и точность сварных конструкций». Основное внимание рабочей группы было сосредоточено на традиционном вопросе технологии производства сварных конструкций — обеспечении их точности. Изучение механизма явлений, связанных с процессом сварки и приводящим к потере конструкциями несущей способности, позволило получить важные теоретические результаты и основанные на них методы и средства борьбы с короблением сварных конструкций. Вторым, не менее важным, достижением этих исследований стали работы, появившиеся вначале как сопутствующие, а затем выделившиеся в самостоятельное направление, по оценке состояния материала конструкций.

Своевременно сделанный акцент на применении вычислительной техники позволил совершенно по-новому взглянуть на проблему обеспечения безопасной эксплуатации сварных конструкций. Уже в начале 1970-х годов были заложены основы построения информационно-измерительных систем, предназначенных для контроля



и оценки состояния материала, высказаны идеи непрерывного мониторинга конструкций и использования беспроводной связи [1]. Необходимо было создать методику контроля и разработать такую технологию, которая могла бы указывать координаты мест развивающихся дефектов и расшифровывать информацию, несущую сведения о накоплении повреждений и развитии трещин в материале, научить системы контроля прогнозировать разрушение и остаточный ресурс материалов эксплуатирующихся конструкций. Реализация этой задачи произошла намного позже, вместе с появлением технологии контроля, основанной на явлении АЭ материалов, генерируемой ими в процессе разрушения. Задача оказалась достаточно сложной, а информационные технологии и средства коммуникации того времени были не готовы к их решению.

Первые компьютеризированные АЭ системы «Аккорд», «Октава» и ряд других, созданные в ИЭС в этот период, были по меркам сегодняшнего дня громоздкими и отличались невысоким быстродействием, тем не менее, только благодаря цифровой обработке информации стало возможным проведение эффективного анализа получаемых данных, выделение их полезной составляющей из огромного потока АЭ сигналов.

Появление систем АЭ контроля заинтересовало оборонную и космическую отрасли промышленности, в результате чего был проведен ряд АЭ исследований целостности корпусов топливных баков ракет в ГKB «Южное» им. М. К. Янгеля, показана эффективность метода при поиске несплошностей и нарушений геометрии крупногабаритных изделий. Даже поиск незакрепленных или плохо закрепленных деталей внутри корпусов контролируемых изделий стал значительно проще и быстрее.

В то время, как решение задачи поиска при помощи АЭ мест развития дефектов успешно продвигалось вперед, основная разрабатываемая проблема — оценка состояния материала и определение его ресурса — пока еще находилась на начальном этапе разрешения. Результаты проводимых исследований показали насколько она сложна. В 1978 г. ИЭС принято решение о необходимости более глубокого ее изучения, а в 1979 г. решением Научного совета по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции» приступила к работе новая его секция «Диагностика надежности сварных конструкций». Возглавил работу секции академик Б.Е. Патон. В 1983 г. на базе лаборатории по технической диагностике сварных конструкций организован структурный отдел ИЭС этого направления, а спустя некоторое время при Президиуме Академии наук Украины был создан Научный совет по проблеме «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», в составе которого начали работать более 20 ин-

ституты и организаций. С этого момента работы в области обеспечения безопасности эксплуатации конструкций стали носить целевой, планируемый характер.

В начале 1982 г. круг специалистов, работающих в области технической диагностики, расширился за счет стран—членов СЭВ. Результатом такого сотрудничества стало создание первого портативного прибора для диагностики материалов на базе метода АЭ, использующего для получения и обработки цифровых данных персональный компьютер. Конструкция прибора была разработана Венгерским институтом ядерных исследований ЦИФИ, а программное обеспечение — ИЭС. Это еще не была в полном смысле диагностическая система, хотя прибор выполнял достаточно много функций, упрощающих анализ получаемых данных и принятие решения о состоянии материала [3]. Прибор, помимо лабораторных исследований, был использован при диагностике промышленных объектов, в частности, трубопроводов в условиях вечной мерзлоты (Тюмень, Уренгой), а также тепловой электростанции в Польше (Жерань). Один прибор был также приобретен Северным машиностроительным предприятием и применен для контроля корпусов подводных лодок.

Очень важным, помимо собственно создания нового высокотехнологичного АЭ устройства, оказался удачно выбранный способ кооперации. Начиная с этого момента, ИЭС больше не занимался непосредственно изготовлением АЭ оборудования, предоставив это специалистам в области электроники, хотя консультативно участвовал в его разработке. Основные же усилия были сосредоточены на создании технологии, средств и программного обеспечения для оценки текущего состояния материалов действующих конструкций, прогнозирования ресурса и продления срока их безопасной эксплуатации.

В начале 1993 г. была разработана новая, более совершенная модель диагностической аппаратуры — системы диагностики семейства ЕМА (Evaluation of Material Ability). Новшеством стало то, что она работала не только с датчиками АЭ, но и с другими типами датчиков, обеспечивая параллельный ввод в компьютер акустических, эксплуатационных и технологических параметров. Аппаратура реализовала введенное по предложению ИЭС новое комплексное понятие в оценке материала при его деформировании — «вектор состояния», представляя к рассмотрению не отдельные измеряемые величины, а их комплекс. Создание таких систем позволило вплотную подойти к решению задач оценки опасности состояния материала, прогнозирования разрушения и определения остаточного ресурса конструкций в процессе эксплуатации.



Опыт использования систем ЕМА-1 и ЕМА-2 показал, что для решения задач оценки и прогнозирования состояния материала, особенно в промышленных условиях, требуется внести ряд кардинальных изменений в конструкцию АЭ аппаратуры, технологию контроля и построение программного обеспечения. Стало очевидным, что требуется использование многоканальных систем с независимой работой отдельных каналов, возможность промышленного исполнения их корпусов с целью установки на производстве и использование многоцелевой, стабильно работающей операционной системы с интегрированными средствами сетевой коммуникации. Параллельно с разработкой нового программного обеспечения, выполняющего прогноз разрушения и предназначенного для работы в компьютерных сетях под управлением Microsoft Windows с ядром NT, с 1997 г. началась разработка современной аппаратуры ЕМА-3 [10]. В 2000 г. был изготовлен и прошел испытания первый лабораторный образец, а начиная с 2001 г. началось внедрение новой системы на Одесском припортовом заводе [8], где в настоящее время эксплуатируется восемь диагностических комплексов, а на конструкциях предприятия установлено более 300 АЭ датчиков. Впоследствии системы ЕМА-3 начали использовать и другие предприятия, в частности, Николаевский глиноземный завод, Укрхимтрансмиак, Техдиагаз, Киевэнерго (рис. 1).

В настоящее время аппаратура и программное обеспечение ЕМА-3 постоянно совершенствуются, а созданные на их основе мобильные и мониторинговые системы работают в различных отраслях украинской промышленности. Главными их особенностями являются возможность автономной работы в течение длительного времени и автоматизированная оценка состояния материала, включающая определение уровня опасности, прогноз разрушающей нагрузки и остаточного ресурса.

Исследования и результаты. Проводимые в ИЭС исследования с самого начала охватывали широкий круг вопросов: разработку конструкции АЭ аппаратуры и датчиков, изучение явления АЭ в разнообразных условиях деформирования материала и влияния окружающей среды, создание и совершенствование методов локализации координат источников АЭ, поиск закономерностей возникновения и изменения сигналов АЭ в процессе накопления повреждений и развития разрушения, создание и проверку критериев оценки состояния материала.

Механические испытания в условиях статического (в том числе на машинах с высокой жесткостью), циклического и ударного нагружения показали, что АЭ позволяет отслеживать процесс развития повреждаемости и разрушения конструкционных материалов фактически на всех стадиях, включая и собственно развитие трещин,

вплоть до разрушения [4]. Использование АЭ аппаратуры в качестве сканирующего средства позволило оценить влияние накопления повреждений на акустические характеристики материалов различных классов [6].

Большое внимание было уделено исследованиям влияния сварки на параметры АЭ в материале [2, 5, 13, 17]. В частности, показано, что при наличии в образце сварного соединения, последнее является основным источником АЭ. Для образцов со сварными соединениями характерно большее разнообразие получаемой картины распределения АЭ, амплитудных и других характеристик, чем для образцов без сварки, а на активность АЭ влияет степень поврежденности материала, внесенного сваркой. Наиболее важным был вывод о том, что наличие сварного соединения повышает информативность метода АЭ.

Промышленное применение метода в химической и энергетической отраслях потребовало проведения специфических исследований влияния зашумленности, наличия изоляции, перехода сред и высоких температур на данные АЭ контроля. В результате разработаны программные методы фильтрации сигналов АЭ в условиях зашумления, показано, что в объектах с изоляцией возможно устанавливать датчики на достаточно больших расстояниях. Показано, что поглощение сигнала на границах сред воздух–металл–вода более чем в два раза выше по сравнению с границей сред воздух–металл–воздух; на границах сред воздух–металл–вода поглощение сигнала более чем в три раза, на границах сред вода–металл–вода — более чем в четыре раза. Важно, что при угасании сигнала в три раза процедура АЭ контроля при определенных условиях также возможна.

Показано, что состояние объектов, работающих при высоких температурах, может быть корректно оценено при помощи метода АЭ [17]. Установлено изменение акустических характеристик исследованных материалов при повышении нагрева рабочей части образца свыше 350 °С. Материал без дефектов или с небольшим их количеством с точки зрения проведения АЭ испытаний менее информативен при высоких температурах, и для определения состояния объектов контроля требуется высокая чувствительность измерительной аппаратуры и специальная методика измерений. Для материала объектов с концентраторами напряжений, сварными соединениями или существенно развитыми дефектами, АЭ испытания могут быть проведены с использованием стандартных методик. При температурах, превышающих 500 °С, актуальной проблемой является обеспечение работы датчиков АЭ, в связи с чем целесообразным представляется использование специальных волноводов, снижающих температуру рабочего участка датчиков. Выполняемый системой



ЕМА-3 прогноз разрушающей нагрузки по данным АЭ зависит от объема получаемой АЭ информации. В тех случаях, когда ее недостаточно для принятия решения о состоянии объекта контроля, следует использовать специальные приемы, позволяющие повысить информативность метода, в частности, переход от локации источников АЭ к зонному контролю.

Полученные результаты позволили продолжить работы по специальной программе с целью набора статистических данных, обработки алгоритмов и программного обеспечения диагностических и мониторинговых АЭ систем, контролируемых объектов, которые работают в условиях высоких температур. Опытный вариант такой системы, контролирующей высокотемпературные объекты цеха производства аммиака, уже используется на Одесском припортовом заводе (рис. 2).

Проведенный анализ состояния материалов разрушившихся изделий, комплексное исследование кинетики накопления повреждений при разрушении образцов из исходного материала и материала, находившегося длительное время в эксплуатации, позволили предложить методику прогнозирования остаточного ресурса на основе оценки постепенного накопления повреждений в процессе работы под нагрузкой.

Параллельно экспериментальным исследованиям развивались теоретические. Получаемые экспериментальные данные имели чрезвычайно сложный, иногда противоречивый характер, не всегда могли быть описаны в рамках известных волновых или статистических закономерностей. Приведем лишь некоторые примеры таких неоднозначностей, которые необходимо научно объяснить:

- при механических испытаниях образцов, вырезанных из прилегающих участков одной и той же конструкции, характер возникновения, распределения и величины параметров АЭ различны;
- число событий АЭ, зарегистрированных в образцах из труб с длительной наработкой, в одних случаях растет, в других уменьшается по отношению к исходному материалу;
- при одинаковом материале и геометрии конструктивных элементов параметры затухания сигналов АЭ отличаются в несколько раз;
- известная гипотеза о микротрещинах как основном источнике АЭ на стадиях деформирования, предшествующих разрушению, не нашла экспериментального подтверждения, поскольку в большей части испытанных образцов, кроме образцов из аварийных участков труб, трещин не наблюдалось вплоть до момента разрушения.

Все имеющиеся результаты исследований необходимо было объяснить в рамках единой, непротиворечивой системы. Для этого потребовались новые подходы к описанию АЭ как следствия процесса накопления повреждений и разрушения ма-

териалов, создание аналитических методов расчета волновых полей, математических моделей, связывающих повреждаемость материала и его акустические свойства, методики прогноза состояния материала по имеющимся на момент контроля результатам АЭ измерений.

Была сформулирована базовая гипотеза о зависимости АЭ преимущественно от сформировавшегося в материале поля повреждений. Изменение плотности поврежденного материала, изменение параметров акустических сигналов в поврежденном материале, рост числа сигналов АЭ при увеличении объема повреждений, внесенных сваркой, позволили рассматривать дискретное возникновение пустот как основной источник АЭ при деформировании на стадиях, предшествующих образованию и росту трещин. Эти данные, подтвержденные также металлографическими исследованиями, могут быть корректно объяснены квантовым подходом к описанию явления АЭ.

Представление процесса разрушения материала в виде отдельных квантов и разработка аналитического аппарата описания процедуры разрушения позволили сформулировать и решить задачу о возникновении и распространении волн АЭ в различных конструктивных элементах, в частности, стержнях и пластинах [11, 13, 16]. Удалось показать, какие виды волн вносят наиболее существенный вклад в регистрируемые параметры АЭ, какие полосы частот являются наиболее приемлемыми для их регистрации и как размеры и характеристики возникающих дефектов связаны с амплитудными характеристиками получаемого АЭ сигнала. Создан универсальный вариант расчета, позволяющий получить решения волновых уравнений с любой комбинацией параметров упругой волны применительно к волновой задаче в пластине с возникшим микродефектом. Интегрирование полученных уравнений перемещений в материале выполнено на компьютере численным методом, а полученные результаты позволили описать распространение волн при разнообразных граничных условиях, а также оценить влияние характеристик датчиков АЭ на спектр и форму распространяющихся в материале волн на различном удалении от источника. Полученные решения позволили создать обучающую программу для коррекции невязок вектора состояния материалов.

Проведенные расчеты позволили на основе развития аналитических методов оценки состояния материала, данных АЭ и использования современной вычислительной техники и методов компьютерного моделирования построить физически обоснованную модель АЭ и перейти на базе созданной модели к прогнозу состояния материала.

Задачу прогноза разрушения начали решать с установления связи между кинетикой повреждаемости материала и возникающей вследствие это-



го АЭ. Импульсы акустической эмиссии являются результатом динамического, дискретного увеличения объема пустот в материале уже на самых ранних стадиях деформирования. Это квантовый процесс, который даже при равномерном нагружении материала происходит дискретно. В процессе деформирования материала происходит возникновение пор, их рост, слияние и, в конечном счете, формирование трещины. Высвобождение энергии при каждом таком событии происходит динамически, порождая АЭ. При этом величина амплитуды возникшей волны, как показали расчеты, зависит от вновь возникшего объема пустоты в материале. На рис. 3 представлены частотные характеристики волн, распространяющихся в тонких пластинах со скоростями, меньшими скорости C_2 — волны Рэлея ($C_2 = 0,31$ см/мкс). Из рис. 3, а видно, что чем толще пластина, тем большая составляющая в ее спектре волны с низкой скоростью. Например, для пластины толщиной 0,4 см появляются волны, распространяющиеся со скоростями $0,1C_2$ (красная кривая). В более толстых пластинах спектр распространяющихся волн сужается и в пластине толщиной 10 см движется практически одна волна со скоростью $0,927C_2$ — близкая к рэлеевской по свойствам. На рис. 3, б, в представлены амплитуды и спектр волн, распространяющихся со скоростями ниже (рис. 3, б) и выше (рис. 3, в) скорости C_2 . Видна зависимость амплитуды волны от толщины пластины и расстояния от места излучения.

Как видно, одинаковый по мощности источник генерирует в тонкой пластине большие амплитуды волн, чем в толстой. Таким образом, становится ясным, что энергия излучения быстрее поглощается в большем объеме металла. На рис. 3, в представлена волна Лэмба, распространяющаяся со скоростью 0,4375 см/мкс с учетом влияния частотных параметров АЭ датчиков. В данном случае датчик настроен на прием АЭ волн в диапазоне волновых чисел $0,6...1,0$ см⁻¹. Усредненная частота 52,2 кГц, длина волны 7,8 см.

Была построена и реализована на компьютере модель, которая дает возможность получать типовые «портреты» АЭ в зависимости от формирования и развития различных полей повреждений. Модель основывается на экспериментальных данных и позволяет задавать различные условия по первоначальной пористости, характеру формирования разрушения, учитывать влияние концентрации напряжений и другие факторы, определяющие характер развития повреждений в материале. Подтверждением ее достоверности послужило решение обратной задачи — было показано, что смоделированные параметры акустических сигналов, проходящих через материал, изменяются таким же образом, как в физическом эксперименте. Был проделан большой объем численных

экспериментов для получения эталонных характеристик АЭ процессов в широком спектре условий накопления повреждений.

Далее перешли к распознаванию — сравнению экспериментальных данных с эталонами — и прогнозу на этой основе разрушающих нагрузок. Распознавание образа выполняется с применением так называемых учителя и самообучения [12, 13]. Данные, полученные в процессе АЭ испытаний, сравнивают с эталоном и определяют прогнозируемую разрушающую нагрузку. В результате обработки более 200 результатов экспериментальных данных (на образцах и натуральных объектах) были получены удовлетворительные результаты прогноза. Проверка при испытаниях на образцах и конструкциях показала достаточно высокую точность предложенной методики, хотя реальные процессы в деформируемом материале сложнее, чем может описать математическая модель. Поэтому в качестве рабочих (методика МА-ПРН/ТКУ–78 от 19.06.2002 г.) погрешностей оценки состояния материала приняты следующие: $\pm 15\%$ с вероятностью 95 %.

Вопрос оценки остаточного ресурса для материалов с эксплуатационной наработкой является весьма актуальным [14]. Для материалов, подвергающихся циклическому нагружению с известными параметрами цикла, методика расчета остаточного ресурса известна. Для прочих материалов, особенно подвергнувшихся действию множества трудно учитываемых факторов в процессе эксплуатации, требуется определение параметров, которые имеют устойчивую закономерность изменения во времени и могут служить для определения их остаточного ресурса. Одним из таких параметров может служить интегральный показатель поврежденности материала $\Delta W_{\text{п}} = 1 - P_{\text{повр}}/P_{\text{исх}}$ [18], определенный по результатам испытаний материалов с известной эксплуатационной наработкой, где $P_{\text{повр}}$ — параметр, отражающий изменение некоторого свойства материала в процессе накопления повреждений по отношению к исходному $P_{\text{исх}}$.

Для получения критерия исследовали большую партию образцов с длительной наработкой из отечественных сталей 17ГС, 17Г1С, Ст20, 09Г2С и ее чешского аналога, представляющих трубопроводы из различных регионов Украины, и образцов из этих же материалов в исходном состоянии — из аварийного запаса. Критерий учитывает общие тенденции изменения структурно-чувствительных параметров вследствие наработки, установленные при АЭ испытаниях, АЭ сканировании, испытаниях на ударную вязкость, методом ЛМ-твердости и взвешиванием малых проб в жидкости. При оценке результатов, полученных перечисленными методами, для каждого был выбран собственный параметр P , отражающий изменение свойств материала вследствие наработки.

При сравнении кривых, показывающих поврежденность $\Delta W_{\text{п}}$ в зависимости от наработки для каждого из методов, оказалось, что они практически идентичны. Таким образом, удалось построить обобщенную для различных методов кривую, связывающую поврежденность $\Delta W_{\text{ср}}$ с эксплуатационной наработкой (рис. 4, а). Перестроив обобщенную кривую в координатах «поврежденность–время» и полагая, что разрушение материала произойдет по достижении им максимально возможной поврежденности $\Delta W_{\text{ср}} = 1$, получим номограмму для определения остаточного ресурса (рис. 4, б).

Наиболее существенной особенностью разработок ИЭС в области АЭ контроля [7, 19] с самого начала стало стремление автоматизировать оценку состояния конструкций, упростить информацию о состоянии конструкции на выходе АЭ системы, представив ее в численном виде. Связано это с тем, что промышленные предприятия требуют именно такой просто анализируемой информации — насколько опасно состояние конструкции, при какой нагрузке можно продолжать эксплуатацию, каков остаточный ресурс. Заказчиков редко интересуют особенности собственно акустических процессов в материале, форма и спектр сигналов, их характеристики и другие научные аспекты вопроса. Исключением являются координаты акустической активности, поскольку их знание помогает пользователям провести при необходимости дополнительный контроль опасных участков конструкции и обеспечить их своевременный ремонт.

Существуют различные способы выполнения АЭ контроля и от того, как именно он проведен, во многом зависит безопасность дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта. К таким способам можно отнести следующие.

1. *Разовый контроль.* Как правило, проводится в процессе плановых механических испытаний объекта (для конструкций, работающих под давлением это чаще всего гидро- или пневмоиспытания). Объект нагружают от нулевой или минимальной нагрузки до величины, которая несколько превышает рабочее значение (величина перегрузки регламентируется государственной или отраслевой нормативной документацией и для сосудов давления составляет 1,25). Если в процессе испытания обнаружены источники повышенной АЭ активности, проводят анализ их опасности для данного объекта и по результатам дают заключение о возможности дальнейшей его эксплуатации и рекомендуемых эксплуатационных параметрах. Достоинством данного подхода является сравнительно низкая стоимость проведения контроля. Сама процедура контроля занимает мало времени и не требует стационарной установки датчиков и аппаратуры, и может быть выполнена с исполь-

зованием мобильных АЭ систем. Недостатками же является то, что, во-первых, при испытании требуется создание избыточной нагрузки, повышающей риск развития дефектов, во-вторых, после проведения испытания объект не контролируется. Возникновение развивающихся дефектов уже после проведения разового контроля может привести к опасной ситуации (рис. 5).

2. *Периодический контроль.* Процедура проведения аналогична разовому контролю, но повторяется с определенным интервалом. Интервал, в зависимости от объекта контроля и его результатов, может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев. Преимуществом периодического контроля по сравнению с разовым является то, что вероятность обнаружения опасных дефектов увеличивается, появляется возможность проведения сравнительного анализа результатов проведенных испытаний и набора соответствующей статистики. Недостатком является удорожание процедуры контроля и создание неоднократных перегрузок конструкции в процессе испытаний.

3. *Мониторинг.* Наблюдение в течение некоторого времени состояния объекта контроля при его работе в эксплуатационном режиме. Основные преимущества — наблюдение не требует изменения рабочих параметров и специального нагружения конструкции, упрощается процедура контроля и снижается его стоимость. Работа без перегрузок, требуемых при обычных испытаниях, продлевает срок службы конструкции. Недостатками являются, во-первых, меньшая вероятность обнаружения дефектов, поскольку отсутствуют перегрузки, создаваемые при разовых испытаниях именно для активизации роста дефектов, во-вторых, отсутствие контроля за состоянием объекта после завершения мониторинга, как и при разовых или периодических испытаниях.

4. *Непрерывный мониторинг.* Отсутствуют недостатки, отмеченные в трех предыдущих пунктах. Акустическая активность отслеживается постоянно, оснащение систем мониторинга средствами автоматизации позволяет оперативно, в реальном времени получать информацию о состоянии контролируемого объекта и своевременно предотвращать опасные ситуации (рис. 6). Сдерживающим фактором при внедрении является высокая стоимость систем непрерывного АЭ мониторинга, связанная с необходимостью стационарной установки датчиков, кабелей, измерительного оборудования, оснащения пульта оператора, обучения персонала и т. д.

За последние 20 лет с применением систем семейства ЕМА испытано более 1000 объектов в Украине, России и Польше. Эффективность метода показана при оценке состояния трубопроводов, емкостей, корпусов различных агрегатов, фермовых конструкций, элементов авиационных и кос-



мических изделий, сосудов, работающих под давлением. Специалистами отдела технической диагностики ИЭС выполнен комплекс научно-исследовательских и организационных работ, ускоривший создание теоретических предпосылок в области диагностики и прогнозирования состояния материалов конструкций, а также практического применения этих разработок. Совместными усилиями ученых и разработчиков контроль состояния конструкций из трудоемкого и малодобного процесса постепенно превращается в автоматизированный, более доступный и эффективный.

Особенности АЭ диагностики промышленных конструкций в сравнении с испытаниями образцов в лабораторных условиях связаны с рядом факторов:

- высокой зашумленностью многих производств, что потребовало разработки высокочувствительной аппаратуры с возможностями частотной и параметрической фильтрации полученных при испытаниях сигналов АЭ;

- невозможностью проведения полного цикла нагружения (от полного отсутствия нагрузки до разрушения объекта), что потребовало создания технологии прогноза разрушающей нагрузки при работе материала в упругой области или при постоянном уровне текущей нагрузки;

- неполной информацией об объекте контроля (иногда неизвестна даже марка материала, из которого изготовлена конструкция), что потребовало создания универсальных алгоритмов прогноза разрушающей нагрузки, ориентированных не на материал, а на поврежденность конструкции;

- ограничениями во времени, накладываемыми на проведение испытаний, поскольку необходимо согласовывать их с производственными процессами, что потребовало создания алгоритмов автоматизации настройки АЭ систем и их эффективной коррекции в реальном времени.

Технология прогноза разрушающей нагрузки, реализованная в программном обеспечении для систем ЕМА-3, позволяет проводить оценку состояния материала промышленных изделий оперативно, в режиме реального времени. При этом активность АЭ показывает наличие в материале повреждений в процессе испытаний, кластерный анализ позволяет определить опасные места. Кластерный анализ работает по принципу группировки в отдельный блок АЭ событий с близкими координатами, а задание параметров кластеризации может быть выполнено АЭ системой автоматически. Прогноз разрушающей нагрузки для каждого кластера выполняется отдельно.

Непрерывный АЭ мониторинг. Сегодня при разработке и совершенствовании оборудования для АЭ мониторинга важно понимать, что это прежде всего информационная система, интеллектуальные возможности которой предоставляет

программное обеспечение. Современная система мониторинга является органичной частью общей информационной системы предприятия и постоянно обеспечивает персонал и руководство предприятия самыми свежими данными о состоянии объектов контроля, оперативно оценивает ситуацию и при необходимости предупреждает об опасности. Основные принципы разработки такой системы и ее архитектура должны соответствовать актуальному уровню задач технической диагностики и методов их решения.

При этом система должна быть интеллектуальной, т. е. решать самостоятельно поставленные перед ней задачи, современной, т. е. использовать наиболее передовые технологии, гибкой, т. е. легко адаптироваться под новые задачи.

Работа созданных автоматизированных систем непрерывного мониторинга базируется на применении АЭ как основного средства диагностики, позволяющего реализовать полный контроль изделий больших размеров и получить информацию из труднодоступных мест. Переход от единичных испытаний к контролю в масштабе цехов и заводов поставил задачи эффективной передачи результатов измерений, обмена данными в реальном времени и взаимодействия разнородных информационных устройств. Использование современных сетевых технологий, протокола ТСР/ІР, стандарта XML [9] позволяет с минимальными затратами развертывать систему непрерывного мониторинга, поэтапно подключая все новые участки контроля к уже задействованным. При этом, как показывает накопленный опыт, контролировать можно не только прочность конструкции, но и технологические процессы, связанные с ее функционированием. Таким образом, разработанные системы АЭ мониторинга представляют собой комплексное решение задачи контроля безопасности производства на всех этапах.

В настоящее время постоянно функционируют двенадцать систем непрерывного АЭ мониторинга ЕМА-3С. Контролируются четыре хранилища ST аммиака Одесского припортового завода, объекты двух цехов производства аммиака и трубы аммиакопровода на двух мостовых переходах, в том числе на километровом переходе через р. Днепр возле Днепропетровска.

Созданию таких систем предшествовала серьезная работа большой группы специалистов: сотрудуников ИЭС, служб технического надзора и лабораторий технической диагностики предприятий, на которых происходило внедрение.

Объекты Одесского припортового завода после введения систем мониторинга в штатную эксплуатацию по заданию предприятия находятся под наблюдением посредством сети Интернет. Современные компьютерные технологии позволяют доставлять информацию по контролю объектов



мониторинга непосредственно на рабочий стол специалистам, участвующим в принятии решения об их состоянии. Такая технология позволяет анализировать информацию по эксплуатации систем мониторинга ОПЗ в реальном времени специалистам ИЭС. Аналогичным образом специалисты ПО «Укрхимтрансаммиак» получают и анализируют информацию по состоянию мостового перехода трубы аммиакопровода через р. Днепр. Имеется возможность и серьезные перспективы организации централизованного контроля всей отрасли, связанной с производством аммиака как на стадии его транспортировки, так и на стадии переработки.

Работа по внедрению систем мониторинга состоит, помимо монтажа оборудования, установки датчиков и прокладки коммуникаций, в создании и отладке программной архитектуры систем мониторинга и алгоритмов оценки состояния объектов контроля, выборе и разработке средств и способов обмена данными, обеспечивающими непрерывный мониторинг, их тестировании, корректировке по результатам опытной эксплуатации и, в конечном счете, передаче системы в штатную эксплуатацию. Накопленный опыт и уже разработанные аппаратные и программные средства, технологии и технические решения позволяют во многом сократить объемы работ по внедрению мониторинговых систем на новых, ранее не контролируемых промышленных объектах, и обеспечить эффективную оценку и прогноз их состояния [15, 20].

Нормативная база и подготовка специалистов. С развитием и распространением методов диагностики возникла потребность в создании центра, который явился бы специализированным переходным звеном между промышленностью и государственными органами, издающими нормативную документацию по методам регламентных испытаний конструкций. В 1993 г. для решения этой задачи, а также для координации работ по контролю за состоянием конструкций усилиями трех ведомств — Госстандарта Украины, Госнадзорохрантруда Украины и Академии наук Украины — на базе ИЭС создан Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТК-78). В составе Комитета в рамках секции по технической диагностике сварных конструкций организовано направление по технической диагностике, созданы рабочие подкомитеты, к управлению которыми привлечены ведущие специалисты отраслей. Созданный комитет осуществляет работы во всех отраслях промышленности. Теперь испытания и оценка состояния материалов конструкций и сооружений в Украине находятся под наблюдением и контролем ТК-78. Одним из основных направлений деятельности Комитета является обеспечение нор-

мативной базы, создание стандартов и методик в области контроля.

Широкая разработка новых средств диагностирования на основе метода АЭ диктует необходимость создания как универсальных нормативных документов первого национального уровня — ДСТУ, независимо от конкретных моделей диагностических средств, так и специфических отраслевых: СОУ — стандартов организаций, СТУ — стандартов научных и инженерных организаций, в соответствии с ДСТУ 1.0:2003 — «Национальная стандартизация. Основные положения». К первому уровню относятся следующие разработанные документы:

– ДСТУ 4046–2001. «Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств», регламентирующий требования к методике испытаний на прочность сосудов и трубопроводов с использованием АЭ метода контроля;

– ДСТУ 4223–2003. «Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги», в котором отражены специфические аспекты технологического процесса АЭ диагностирования указанных объектов;

– ДСТУ 4227–2003. «Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки», в котором приведены конкретные требования к подготовке, проведению АЭ диагностирования и принятию решения о техническом состоянии объекта по результатам проведенной АЭ процедуры.

Документы других уровней в основном имеют специфическую отраслевую направленность и выпущены ТК-78.

Всего Комитетом было выпущено более 20 отраслевых нормативных документов, в частности:

– МДУ 016/10–2002. Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси. Методика державної метрологічної атестації;

– Методика аттестации многоканальной системы акустико-эмиссионной диагностики по определению разрушающей нагрузки. № 2. ТК-78. — Изд-во «Индпром». — Киев. — 2002. — 18 с.

– МР 50.01–2003. Методические рекомендации по акустико-эмиссионному диагностическому контролю объектов газохимических производств;

– СТП 50.01–2000. Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Акустико-емісійний метод контролю;

– СТП 50.07–2006. Методичні рекомендації з акустико-емісійного діагностування обладнання основних виробництв хімічної, нафтохімічної та нафтогазопереробної промисловості. Загальні вимоги;

– СОУ 50.06–2006. Технічна діагностика. Вимоги до підготовки і атестації персоналу з акустико-емісійного контролю та діагностування промислових об'єктів;



– Інструкція експертного обстеження (технічного діагностування) стану металу посудин, що працюють під тиском, при використанні акустико-емісійного методу контролю (2008);

– Інструкція експертного обстеження (технічного діагностування) стану металу трубопроводів пари та гарячої води при використанні акустико-емісійного методу контролю (2011);

– Методика періодичного акустико-емісійного моніторингу газопроводів (2011).

Созданные и разрабатываемые нормативные документы позволяют расширить область приме-

нения АЭ на производстве, доказывая тем самым его эффективность и одновременно повышая безопасность эксплуатации ответственного оборудования.

С расширением сферы применения метода АЭ вплотную встал вопрос о подготовке кадров в данной области. Недостаточное количество специалистов по диагностике материалов в условиях постоянно растущих требований к прочности и надежности конструкций вызвало необходимость организации их планомерной подготовки. Рассматривая эту проблему как одну из составных частей проблемы обеспечения надежности и безопасности эксплуатации конструкций и учитывая, что подавляющее большинство их изготавливается с применением сварки, была организована подготовка специалистов в области технической диагностики на базе крупных учебных центров страны. Начиная с 1990 г., совместными усилиями ИЭС и Киевского политехнического института при ряде вузов страны, включая НТУУ КПИ, на базе специальности «Оборудование и технология сварочного производства» была создана новая специализация 12.05.04 «Диагностика и прочность сварных конструкций». Предусмат-



Рис. 1. Лабораторные испытания образцов с применением системы ЕМА-2 (а); контролируемые барабаны котла тепловой электростанции в г. Варшава и первый портативный АЭ прибор для их контроля (1991 г.) (б); демонстрация первого образца системы ЕМА-3 (в)



Рис. 2. Современный вариант системы ЕМА-3 перед проведением высокотемпературного испытания (а); датчики системы ЕМА-3 при гидроиспытаниях трубы (б); датчики АЭ на образце из трубной стали (в); специальный стенд ИЭС для АЭ испытаний конструкций (г); образец, нагретый до 820 °С при высокотемпературных АЭ испытаниях (д)

ривалась подготовка специалистов достаточно широкого профиля для работы в области диагностики технического состояния и прогнозирования ресурса сварных конструкций. Следует отметить, что указанная специализация не получила достаточно полного последующего развития, все ограничилось введением дополнительных дисциплин к существующей специальности по сварным конструкциям. В 2007 г. ВАК Украины созданы при ИЭС и Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины два специализированных Ученых совета по защите кандидатских и докторских диссертаций по специальности 05.02.10 «Диагностика материалов и конструкций» (рис. 7).

За рубежом подготовке контролирующего персонала уделяется исключительно важное внимание на государственном уровне, хотя непосредственный контроль во многих случаях осуществляют частные фирмы, например TUV в Германии и других странах. TUV, кроме контролеров, го-

товит также технических экспертов, на которых возложена ответственность за принятие решения о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций по результатам контроля. В странах СНГ и в Украине подготовка специалистов в области контроля также имеет определенную специфику, так как именно контролеры в этих странах должны давать заключение о состоянии конструкций и определить срок ее дальнейшей эксплуатации. Такая постановка задачи требует введения в программу обучения курса технической диагностики с понятием прогнозирования состояния конструкций с заданной вероятностью, что предусматривает соответствующая нормативная документация и, в частности, ГОСТ 20911–89.

С учетом изложенного выше в Украине по специальности «АЭ контроль» готовятся специалисты трех уровней. Первый и второй готовят специалистов по неразрушающему контролю с применением АЭ. При этом решение о состоянии контролируемого объекта принимается на основании

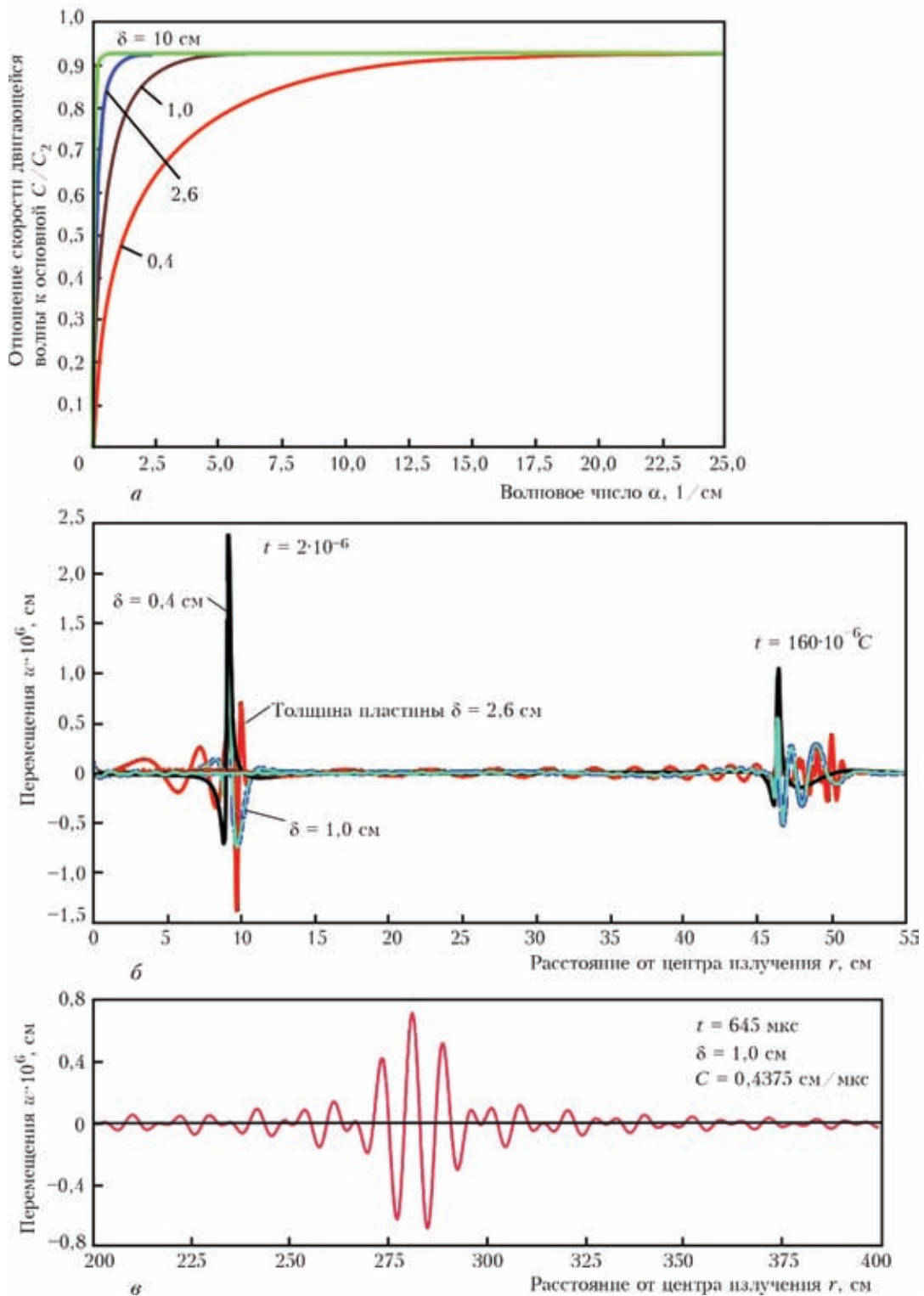


Рис. 3. Пример спектра волн (а) и АЭ сигналов для пластин разной толщины (б, в)

традиционной нормативной документации или специалистами, прошедшими обучение с курсом технической диагностики. Третий уровень подготовки выпускает специалистов, способных принять решение о состоянии объекта на основании показаний диагностической АЭ аппаратуры. В программу подготовки специалистов третьего уров-

ня входит курс технической диагностики, даются более глубокие представления об АЭ и технологии контроля на ее основе. Эту работу проводят специальные центры на государственной основе.

В 1994 г. на базе ИЭС открылись курсы подготовки специалистов по технической диагностике для специалистов, уже имеющих опыт в об-

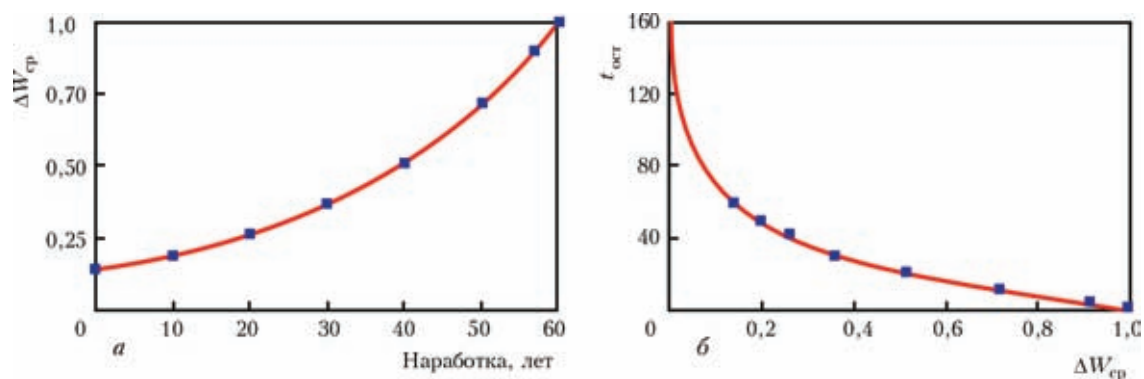


Рис. 4. Осредненная кривая поврежденности ΔW_{cp} по данным различных методов (а) и номограмма для определения остаточного ресурса трубопроводов $t_{ост}$ по известной поврежденности (б)



Рис. 5. Обследование подземного перехода газопровода «Ефремовка–Диканька–Киев» диаметром 1020 мм через автомобильную дорогу Киев–Харьков (305,6 км) (а); датчики АЭ при контроле газопровода распределительной станции (б); датчики АЭ на трубах теплотрассы (в); типовое состояние узла теплотрассы (г); аммиачный холодильник, при контроле зарегистрирован высокий уровень непрерывной АЭ и обнаружена течь (д); объекты производства карбамида ОПЗ, для которых выполняется периодический контроль (е)

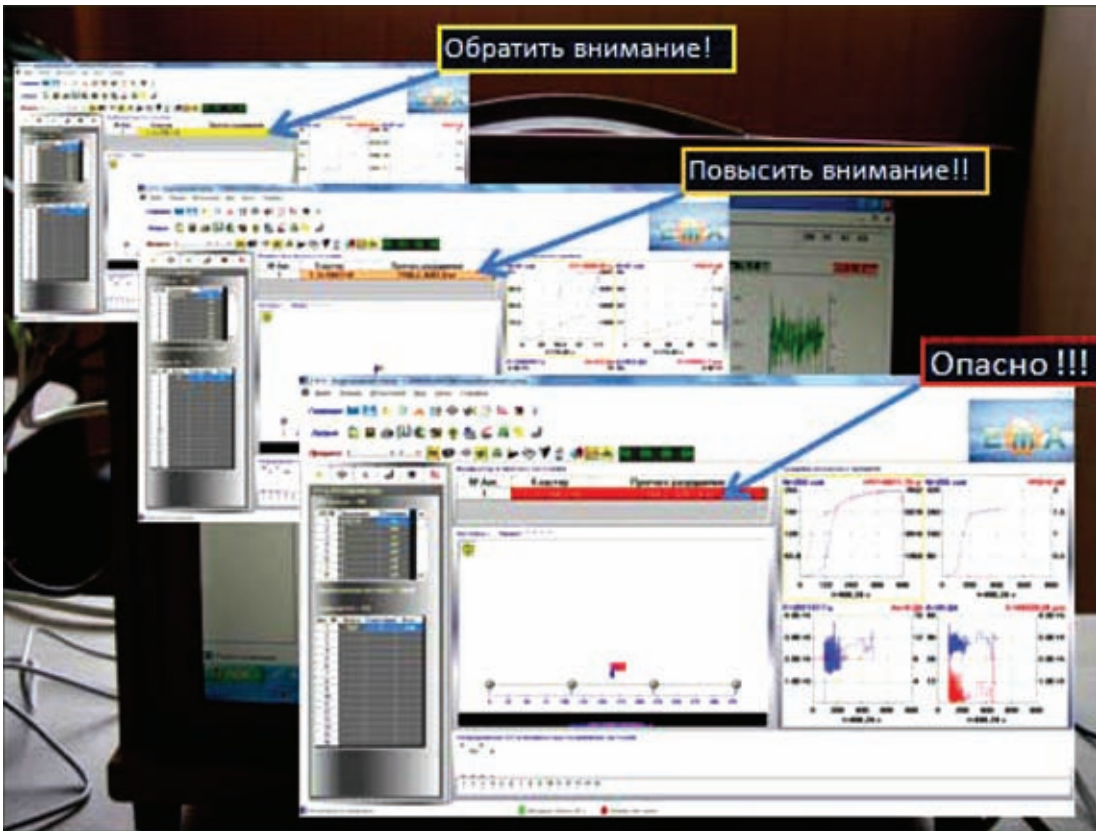


Рис. 6. Три предупреждения, генерируемые системой ЕМА-3 (показаны стрелками)



Рис. 7. Слушатели курсов по подготовке специалистов в области АЭ контроля (а); академик Б. Е. Патон открывает заседание ТК-78 (б)

ласти контроля и работающих в различных областях промышленности. С 1998 г. эти курсы начали работать под учебно-методическим контролем Госгорпромнадзора Украины.

Перспектива развития АЭ технологий. Рассмотрим общемировые тенденции в разработке и применении АЭ технологии при контроле состояния конструкций и сооружений. В настоящее время понятие «интеллектуальная конструкция», например, по отношению к мостам употребляется все чаще и подразумевает конструкции, которые сами определяют, в каком состоянии они находятся, и можно ли продолжать их эксплуатацию. Такие конструкции начали появляться в США, Финляндии и в Украине.

Интеллектуальные системы оценки состояния конструкций и сооружений, выполненные на современном уровне, должны обеспечить следующие основные функции:

- измерение, обработку и представление с заданной степенью вероятности исходных данных, необходимых для оценки несущей способности конструкций;
- экстраполяцию полученных исходных данных в направлении принятой прогнозной координаты;
- расчет несущей способности и остаточного ресурса конструкций по поступившей прогнозной информации и дополнительной информации, характеризующей условия производства и эксплуатации конструкции;

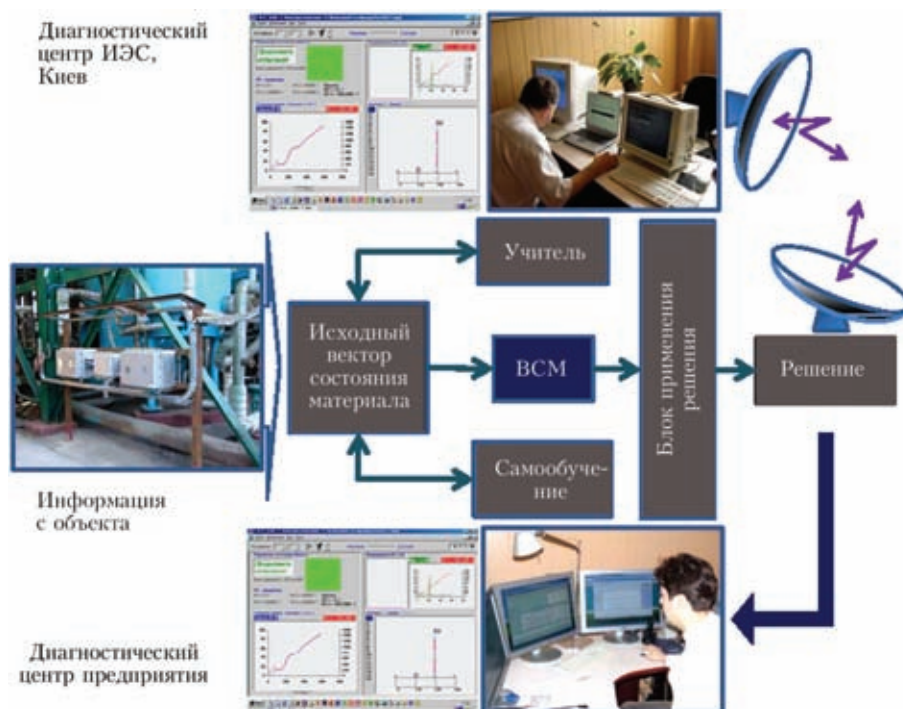


Рис. 8. Дистанционный контроль состояния конструкций

– оценку состояния конструкции и возможных последствий аварии с отработкой вариантов последствий по степени опасности;

– выбор оптимального варианта и принятие решения;

– в соответствии с принятым решением задачу команды исполнительным механизмам для изменения режима работы конструкции с целью выхода из аварийного состояния, сообщение о возможности выполнения ремонтно-восстановительных работ, необходимости частичного или полного прекращения функциональной деятельности узла или конструкции в целом;

– передачу информации о состоянии конструкции в центральный диагностический пост для принятия решения по всему объекту.

Стационарные диагностические системы непрерывного мониторинга на ряде предприятий Украины уже более восьми лет работают, определяя состояние конструкций с заданной вероятностью и при установленных пределах погрешности. При этом диагностическая информация передается по компьютерным сетям как в диагностический центр предприятия, так и в дублирующие центры, находящиеся на любом расстоянии от контролируемой конструкции (рис. 8).

Для повышения эффективности внедрения в промышленность технологий на основе метода АЭ в ряде стран созданы следующие рабочие группы, объединяющие специалистов-разработчиков АЭ технологий и пользователей:

– АЕWГ — Американская рабочая группа по АЭ;

– JCAE — Японский комитет по АЭ;

– EWGAE — Европейская рабочая группа по АЭ;

– GLEA — Латино-американская рабочая группа по АЭ;

– РРГАЭ — Российская рабочая группа по АЭ при Госгорнадзоре России;

– УРГАЭ — Украинская рабочая группа по АЭ при ТК-78.

Указанные рабочие группы проводят необходимые исследования в направлении АЭ, создают и распространяют необходимую нормативную документацию, проводят научные и практические конференции и семинары. С целью придания работам по АЭ контролю большего значения и усиления их координации при 135 комитете ИСО по неразрушающему контролю создан подкомитет №9 «Acoustic emission testing» с центром, расположенным в Бразилии, который в 2006 г. приступил к координации работ в области применения АЭ при контроле и испытании конструкций и сооружений.

В Украине в настоящее время существует понимание на государственном уровне важности работ в области технической диагностики, в связи с чем многие из них, в частности, работы по развитию средств и технологий АЭ контроля, выполняются в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». Таким образом, на сегодня созданы многие из необходимых условий для развития метода АЭ и внедрения его на производстве — государственная поддержка, нормативная база, оборудование и технологии, подготовка кадров. Внедрение систем непрерывного АЭ мо-



нитинга на ряде промышленных предприятий стало свершившимся фактом и показало высокую эффективность разработанных технологий, позволяющую повысить безопасность эксплуатации дорогостоящего оборудования и обеспечить предприятиям, использующим эти технологии, существенную экономию средств на плановые остановки, ремонты и периодический контроль.

Стремительное развитие средств контроля конструкций, особенно применяющих АЭ технологию, и то внимание, которое уделяется этому вопросу мировым сообществом, дает перспективу широкого применения АЭ для создания интеллектуальных конструкций и сооружений, которые с заданной точностью и вероятностью сами будут сообщать о своем состоянии и предлагать меры выхода из затруднительных ситуаций. Другими словами, системы непрерывного мониторинга, использующие интегральные методы контроля и, в частности АЭ, будут все шире применяться при контроле потенциально опасных в эксплуатации, а затем, по мере упрощения технологии их создания, и в обычных промышленных конструкциях. Следует также предположить расширение сети специализированных центров контроля эксплуатирующихся конструкций. Такие центры будут укомплектованы специалистами высокой квалификации, а современные цифровые технологии и средства коммуникации позволят им проводить мониторинг и оценивать состояние конструкций дистанционно, находясь от объекта контроля на любом расстоянии. Прогресс в развитии данной технологии позволит в ближайшем будущем подойти к созданию систем на основе АЭ, которые не только контролируют конструкции, но и управляют процессом их эксплуатации с точки зрения безопасности.

Выводы

Исследования в области АЭ, проводимые в течение длительного периода, показали эффективность метода при поиске дефектов и оценке состояния образцов и конструкций из широкого класса материалов в лабораторных и промышленных условиях, в широком диапазоне температур и при различных условиях среды.

Разработана технология, позволяющая эффективно использовать метод АЭ в условиях производства, включающая определение координат, возникающих или развивающихся при разрушении материалов конструкций дефектов, фильтрацию общего потока АЭ сигналов с целью выделить сигналы, несущие необходимую информацию о дефектах материалов, предложены и исследованы критерии кластеризации АЭ информации для последующего анализа, разработана система эталонов-учителей для выбора по данным кластеров наиболее соответствующего варианта разрушения материала.

Изучены теоретические вопросы прогнозирования разрушения на основе данных АЭ контроля и получены аналитические зависимости для алгоритмов самообучения при выполнении процедуры диагностики. Показано, что процедура принятия решения о состоянии материала может быть успешной, если наперед задана невязка между информацией, получаемой прибором АЭ, и эталоном. Выполненные исследования позволили прогнозировать разрушающую нагрузку материала на ранних стадиях разрушения.

Исследована взаимосвязь АЭ с накоплением повреждений в материале при деформировании и в процессе эксплуатации. Разработана методика оценки поврежденности и определения остаточного ресурса конструкций с эксплуатационной нагрузкой по данным АЭ контроля.

Разработки в области АЭ получили внедрение в промышленность при поиске и оценке опасности существующих и возникающих в процессе эксплуатации дефектов для широкого класса материалов и конструкций. Главным достижением является создание на базе проведенных исследований и внедрение технологии непрерывного мониторинга конструкций в процессе их эксплуатации с определением разрушающей нагрузки и остаточного ресурса материала в реальном времени. Использование передовых информационных технологий, Интернета и средств беспроводной связи обеспечивают передачу данных о состоянии материалов конструкций на любые расстояния, что позволяет контролировать работу конструкций дистанционно.

Выполненные научные разработки, созданная нормативная и методическая база, подготовка специалистов и разработанная технология контроля позволяют эффективно внедрять метод АЭ на производстве в самых разных отраслях промышленности, энергетики и транспорта.

1. *О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций* / Б. Е. Патон, И. В. Кудрявцев, А. Я. Недосека, А. Е. Коротынский // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 1—5.
2. *Применение датчиков акустической эмиссии в системе диагностики надежности сварных конструкций* / Б. Е. Патон, А. А. Грузд, Л. Ф. Харченко, Ю. Г. Куценко // Там же. — 1979. — № 5. — С. 3—10.
3. *Пеллионис П., Герев Я.* Методика и аппаратура для АЭ-контроля в процессе проверочных испытаний сосудов высокого давления ядерного реактора в Венгрии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 3. — С. 14—21.
4. *Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Лебедев А. А.* Влияние вида напряженного состояния на параметры акустической эмиссии на заключительных стадиях деформирования металлов // Там же. — 1993. — № 3. — С. 18—23.
5. *Technical diagnostics — welded structures prolongation possibility of exploitation estimation* / B. E. Paton, L. M. Lobanov, A. J. Nedoseka, S. A. Nedoseka // J. of the Intern. Institute of Welding. — 2001. — 45. — P. 201—205.



6. Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8—12.
7. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Там же. — 2003. — № 4. — С. 6—10.
8. О непрерывном мониторинге хранилищ жидкого аммиака / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко, А. А. Елкин и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 2. — С. 10—17.
9. Недосека С. А. К стандартизации применения XML (eXtensive Markup Language) в автоматизированных системах АЭ диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 2. — С. 9—16.
10. Недосека С. А., Недосека А. Я. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Там же. — 2005. — № 3. — С. 20—26.
11. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О волнах Рэлея в пластинах ограниченной толщины // Там же. — 2006. — № 3. — С. 3—8.
12. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. — 2007. — № 2. — С. 3—9.
13. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
14. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 5—19.
15. Об опыте применения АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 4. — С. 85—95.
16. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов // Там же. — 2009. — № 3. — С. 11—17.
17. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2. / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. — 2009. — № 4. — С. 5—13.
18. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. — 2010. — № 1. — С. 9—16.
19. Недосека А. Я., Недосека С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) // Там же. — 2010. — № 2. — С. 7—17.
20. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и газокomppressorных станций методом акустической эмиссии // Там же. — 2011. — № 4. — С. 3—13.

Поступила в редакцию
18.01.2012



СВАРКА и РЕЗКА - 2012

12-я Международная специализированная выставка

10–13 апреля 2012

Минск

ЗАО «Минск-Экспо»

Тематика выставки

- материалы для сварки, наплавки и пайки
- оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- научное и информационное обеспечение сварки
- система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- сертификация сварочного оборудования

Одновременно с выставкой «Сварка и Резка» будут работать выставки «Защита от коррозии. Покрытия» и «Машиностроение».

Контакты: тел./факс: +375 17 226 98 58, e-mail: e_fedorova@solo.by