

## СОЗДАННЫЕ В ИЭС им. Е.О. ПАТОНА ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Отдел технической диагностики сварных конструкций создан в 1983 г. на базе лаборатории того же наименования, работающей в этом направлении с 1963 г. Отдел является структурным подразделением Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (рис. 1).

С 1993 г. на базе отдела по направлению техническая диагностика работает Технический комитет стандартизации Украины № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТК 78), созданный НАН Украины, Госстандартом и Комитетом по охране труда Украины (Приказ № 60/106 от 3 мая 1993 г.). С участием отдела издается международный научно-технический и производственный журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (четыре номера в год). Заведующий отделом А.Я. Недосека является заместителем главного редактора журнала.

После рассмотрения работ отдела в 2017 г. на координационном совете программы «Горизонт 2020» отдел был включен в состав исполнителей по теме 3.1b. (Aero UA feasibility study work plan proposal for pilot project). Грант № 724034.

Отдел проводит исследования и разработки по проблеме «Техническая диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных соединений, материалов, покрытий и конструкций в процессе их эксплуатации на основе акустической эмиссии».

Цель – разработка теории, методов и средств обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений.



Рис. 1. Лаборатория технической диагностики в 1979 г.

Указанная проблема включает разработки по следующим направлениям:

1. Теоретические и экспериментальные исследования явлений, сопутствующих деформированию и разрушению материалов и сварных соединений в результате быстрых местных изменений их структуры в процессе разрушения, зарождения и развития трещин и других дефектов. Разработка теории квантовой механики разрушения.

2. Разработки по п. 1 проводятся методами статистической механики, математического моделирования, теории и методов прогнозирования, теории принятия решений о состоянии материалов конструкций.

3. Исследования и разработки по пп. 1, 2 позволили построить диагностические мониторинговые и экспертные системы и приборы, а также методы их применения (за рубежом Structural Health Monitoring – SHM технология).

4. Внедрение указанных разработок в заинтересованных ведомствах и, в первую очередь, на:

- трубопроводном транспорте;
- энергетических установках;
- предприятиях химического и нефтеперерабатывающего профиля;
- предприятиях металлургического профиля;
- элементах узлов, сварных соединениях, материалах с покрытиями и без них, в конструкциях машиностроения.

На основе проведенных работ получены следующие результаты.

### **В области теории:**

- получены основные аналитические зависимости для кванта излучения, возникающего при зарождении и развитии дефектов в материалах при их деформировании. Получены формулы, описывающие излучения, возникающие при образовании и развитии повреждений в материалах, что позволило более глубоко проанализировать процессы деформирования материалов и скорректировать программное обеспечение диагностической системы, а также повысить точность и информативность данных испытаний. Аналитически показано, что акустико-эмиссионные (АЭ) волны распространяются в материалах конструкций со скоростями, значительно превышающими

ми базовую скорость продольной волны  $C_1$  ( $C_2$  – скорость поперечной волны), см. рис. 2;

- разработан и введен в практику расчетов вектор состояния материалов (ВСМ), позволяющий статистическим путем анализировать этапы разрушения материалов при их деформировании и поэтапно предсказывать ход процесса разрушения. На основе исследований ВСМ готовятся методические материалы для диагностики состояния промышленных конструкций. Разработанная на основе ВСМ технология позволяет, не прерывая эксплуатацию конструкции, определять разрушающую нагрузку, предел длительной прочности материалов независимо от количества часов наработки, определять остаточный ресурс материала с вероятностью 0,95 и погрешностью  $\pm 15\%$ . По указанным показателям метод аттестован УкрЦСМ (ГП «Укрметртестстандарт»). Созданы и утверждены УкрЦСМ методики поверки показателей погрешности оценок;
- предложено и введено в практику в виде действующих программ и алгоритмов понятие «Нормированный интеллектуальный совет» (НИС). Его использование позволяет автоматизировать принятие решения о мерах, которые необходимо предпринять при возникновении

опасных ситуаций разных типов при эксплуатации конструкций. НИС формируется на основе данных реального времени о состоянии конструкции и опыте ее предшествующей эксплуатации, что позволяет перейти от простого мониторинга конструкции к управлению эксплуатационными параметрами. Программы, использующие НИС, установлены на Одесском припортовом заводе и обеспечивают рекомендации персоналу цеха перегрузки аммиака. На рис. 3 показан базовый прибор ЕМА-4, являющийся основой диагностических комплексов и его применение в системе контроля аммиакопровода над каналом с питьевой водой в районе села Апостолово (рис. 4).

**В области экспериментальных работ:**

- в дополнение к исследованиям, проводимым непосредственно в отделе, созданы и функционируют на ряде предприятий Украины удаленные испытательные центры на базе систем непрерывного мониторинга конструкций. Обратная связь и управление этими центрами установлена из центра, находящегося в ИЭС. Системы по линиям связи через интернет передают информацию о состоянии контролируемых конструкций в ИЭС (отдел № 59). Таким образом, исследования

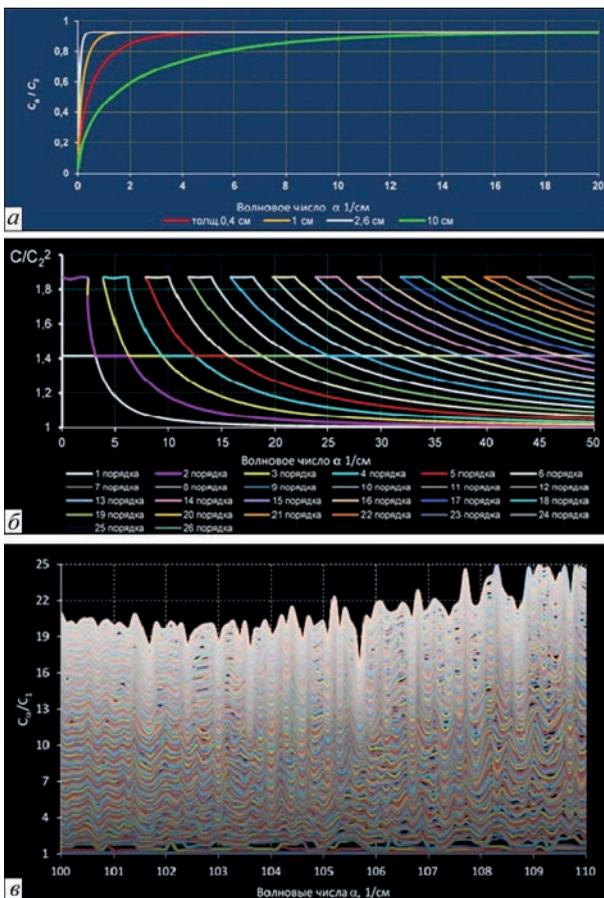


Рис. 2. Диаграмма спектров распространения АЭ волн для трех диапазонов скоростей: а – ниже  $C_2$ ; б – выше  $C_2$ , но ниже  $C_1$ ; в – выше  $C_1$



Рис. 3. Приборы ЕМА-4 (4-х и 16-ти каналные)



Рис. 4. АЭ- и тензоконтроль аммиакопровода у села Апостолово с передачей информации в центральный диагностический центр в г. Киеве

развития разрушения материалов эксплуатирующихся конструкций проводятся отделом на базе практических оценок их работоспособности в реальных условиях. Методика контроля позволяет вмешиваться в процесс испытаний, корректировать и обновлять прогнозные программы из единого удаленного центра. Такие исследования и основанные на их результатах системы непрерывного мониторинга осуществлены впервые в мировой практике. Системы указанного типа установлены на Одесском припортовом заводе (семь систем), Киевских ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6 (две системы, работающие при температуре 450 и 560 °С), на конструкциях предприятия Укрхимтрансаммиак – мостовом километровом переходе через реку Днепр (одна система) и через дорогу и водоканал в районе Кривого Рога (одна система);

- результаты, получаемые при реальной эксплуатации конструкций, позволяют более глубоко исследовать процессы разрушения и принимать необходимые меры по корректированию и совершенствованию теории и методик диагностического контроля.

#### **В области создания методических материалов:**

- разработаны 37 нормативных материалов и методик диагностирования, которые в зависимости от выполняемых работ и вида необходимого контроля передаются производству. Это методики по АЭ диагностике работоспособности трубопроводных систем и сосудов нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств, работающих под давлением как при нормальных, так и при низких (до минус 30 °С) и высоких (до 560 °С) температурах;
- совместно с АО «Видеотон» (Венгрия) разработана мобильная передвижная система технической диагностики ЕМА. Аппаратура ЕМА моделей 2, 3 и 4 запущена в производство;
- разработана методика комплексной метрологической аттестации системы АЭ диагностики, что позволило провести сертификацию оборудования. Метрологические характеристики аппаратуры устанавливаются по следующим блокам параметров:
  - электронная часть аппаратуры;
  - измерительные датчики;
  - блок измерения координат АЭ событий;
  - блок прогнозирования разрушающих нагрузок.

#### **В области практического освоения результатов разработок:**

- разработана технология дистанционного непрерывного мониторинга состояния конструкций в процессе их эксплуатации. Создан центр управления контролем, позволяющий оценивать прочность материала конструкций, находящихся на любом расстоянии от центра.

Смонтированы и запущены в эксплуатацию 11 таких систем для мониторинга промышленных конструкций повышенной опасности;

- проведены индивидуальные испытания более 1000 узлов сосудов, работающих под давлением.

#### **В области подготовки и переподготовки специалистов по АЭ диагностике:**

- в соответствии с решением ТК 78 создан аттестационный центр по подготовке и переподготовке специалистов в области АЭ диагностики (рис. 5). С момента создания центра и по настоящее время обучение прошли более 2000 специалистов из различных промышленных предприятий Украины, России, Словении. Также в соответствии с решением ТК 78 созданы и работают постоянно действующие курсы по подготовке и переподготовке специалистов первого, второго и третьего уровней в области технической диагностики;
- разработаны программы переподготовки и созданы на их основе соответствующие методические материалы;
- в 2008 г. вышло 4-е издание учебного пособия по курсу «Основы расчета и диагностики сварных конструкций» под редакцией академика Б.Е. Патона, а в 2012 г. вышел методический альбом «Акустическая эмиссия и ресурс конструкций». Учебное пособие в виде монографии издано в Англии в 2012 г. издательством «Cambridge International Science Publishing Limited». В связи с появлением большого объема новых исследований и разработок в области АЭ диагностики подготовлено 5-е издание учебного пособия.

*За последние годы отделом выполнены и отражены в публикациях и отчетах следующие работы:*

1. Аналитически показано, что в твердых телах распространяются волны со скоростями выше  $C_1 \approx 0,5$  см/мкс для сталей. Поэтому скорости  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  (скорость волны Рэлея) могут быть приняты в расчетах за базовые физические постоянные. Скорости выше  $C_1$  опытным путем не зафиксированы в связи с тем, что существующие АЭ датчи-



Рис. 5. Подготовка специалистов по технической диагностике

ки строятся, в основном, на пьезокерамических преобразователях, которые, имея четкую амплитудно-частотную характеристику, не фиксируют волны, распространяющиеся с высокими скоростями (рис. 2).

2. Показано, что путем прозвучивания материалов с дефектами с помощью АЭ аппаратуры можно получить характеристики, четко связанные с появившимися в материале дефектами.

3. Аналитически исследована спектральная картина волновых процессов, формирующихся в пластинах при возникновении повреждений. Разработаны специальные методики и программы для выбора в общем волновом поле пластин требуемых рабочих частот и параметров АЭ преобразователей.

4. Аналитически и экспериментально изучено влияние локального скопления дефектов в пластинах на распространение АЭ волн.

5. Исследования, проведенные с помощью АЭ, показали, что дефекты формируются на микроуровне в виде перемещения дислокаций. Далее они развиваются, увеличивая размеры, вплоть до разрушения. Эти стадии хорошо улавливает аппаратура на основе акустической эмиссии, что позволило построить математическую модель развития дефектов в материалах и создать методику оценки состояния материала по данным АЭ.

6. Специально разработанная методика позволила создать систему непрерывного мониторинга конструкций, эксплуатирующихся при высоких температурах. Системы на основе АЭ технологии,

внедренные на киевских ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6, позволяют при действующих в процессе эксплуатации нагрузках прогнозировать разрушающую нагрузку и остаточный ресурс материала.

7. Исследован аналитически и подтвержден экспериментальным путем механизм возникновения продольных трещин в трубопроводах, работающих при высоких температурах.

8. Проведен анализ и показано, что современное состояние физических методов анализа и уровень развития вычислительной техники позволяют создавать методики и математическое обеспечение, решающие сложные задачи в оценке состояния конструкций. Развитие интеллектуальных технологий в контроле состояния конструкций привело к созданию «умных» методов контроля и контролирующего оборудования.

9. Проведены аналитические и экспериментальные исследования распространения АЭ волн в сварных соединениях из разнородных материалов с близкими физическими свойствами. Показано, что наличие разнородности материалов в соединении влияет на распространение АЭ волны, разнородность приводит только к изменению амплитуды сигналов. Последнее свойство было использовано при испытании трубопровода в печи риформинга Одесского припортового завода.

10. Проведены сравнительные испытания различных методов контроля дефектов при испытаниях, проведенных в мае 2016 г. на базе компании PEVE COOP Ltd г. Хайдусобосло (Венгрия) специ-

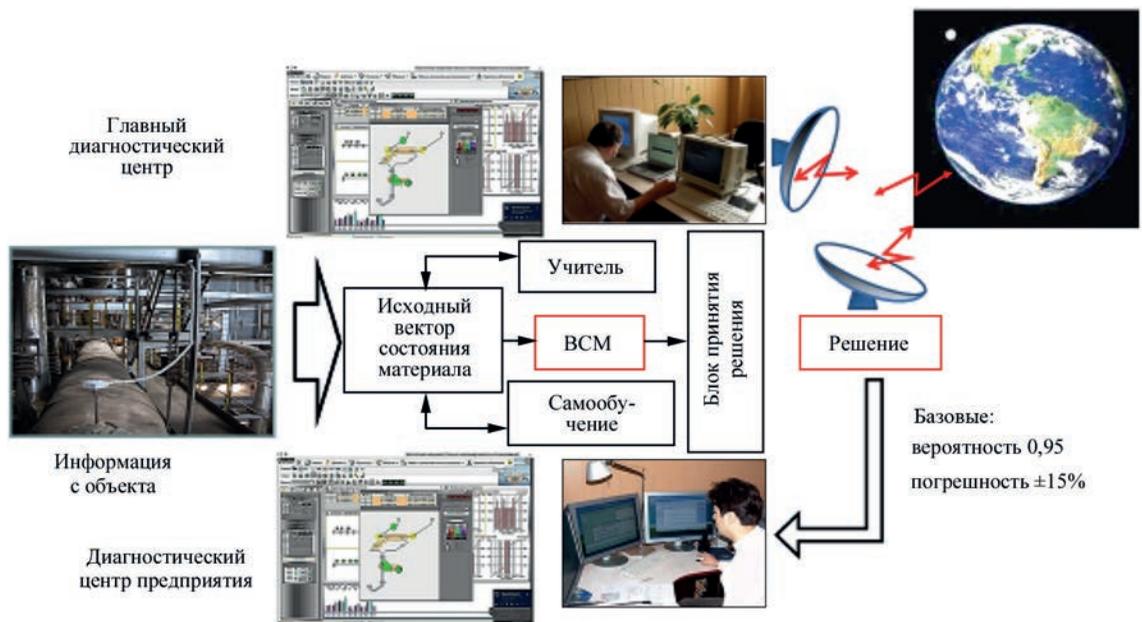


Рис. 6. Схема обработки информации, поступающей с объекта контроля последовательно (на рисунке слева направо) в аналитический блок, где происходит первый этап обработки информации и при достижении заданных показателей по вероятности и ошибке прогноза решение, как предварительное, поступает в блок принятия окончательного решения. Далее результаты решения поступают в диспетчерский пункт предприятия и по линии интернет связи в главный диагностический центр, который может быть расположен на любом расстоянии от местонахождения контролируемой конструкции. Главный диагностический центр учитывает эту и другую информацию при принятии окончательного решения о мероприятиях, которые необходимо выполнить по контролируемой конструкции

алистами в области неразрушающего контроля из Австрии, Венгрии, Германии и Украины. Испытанию внутренним давлением подвергались сосуды для хранения пропан-бутана объемом 5 м<sup>3</sup>, длиной 4,335 м, диаметром 1,25 м и толщиной стенки 6 мм, выполненные из стали St 52-3. При проведении испытаний была проверена методика ИЭС по прогнозированию разрушающей нагрузки. Испытания показали, что разрушающая нагрузка была спрогнозирована с погрешностью, не превышающей 5 %.

Работы по пп. 1–10 отражены в следующих публикациях: Недосека А.Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром; Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2012) *Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение*. Киев, Индпром; Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций (АЭ технологии и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе). *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 2, 3–18; Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном контроле трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 3, 7–14; Недосека С.А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 2, 3–9; Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Техн. диагност. и неразруш.*

*контроль*, 1, 9–16; Недосека А.Я., Недосека С.А. (2014) Особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 2, 3–11; Недосека А.Я., Недосека С.А., Овсиенко М.А. и др. (2016) Испытание сосудов давления международной группой специалистов. *Техн. диагност. и неразруш. контроль*, 3, 3–10.

*Последующие работы предполагают:*

1. Обеспечить постепенный переход от непрерывного АЭ мониторинга к управлению эксплуатацией конструкций по их фактическому состоянию.

2. С целью расширения географии применения разработок отдела и совершенствования технологии оценок состояния конструкции продолжить исследования и разработки в направлении изучения и совершенствования обработки информации, поступающей с мониторинговых систем, установленных в любой точке земного шара (рис. 6).

3. Большое значение приобретает работы по оценке энергии разрушения материалов, которую можно оценивать методом АЭ. Это дает возможность существенно повысить точность прогнозирования разрушающих нагрузок. Поэтому этому вопросу предполагается уделить повышенное внимание.

4. Проведение исследований и разработок в направлении расширения применения методик и технологии АЭ контроля для конструкций:

- сложной геометрической формы;
- работающих при температурах до 1000 °С;
- изготовленных из композитных материалов.

А.Я. Недосека

**9-а Національна науково-технічна конференція і виставка**

**Неруйнівний контроль та технічна діагностика**

**Україна, Київ, 19-21 листопада 2019**

**ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України**  
**Міжнародний виставковий центр**

 Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона  
Національної академії наук України  
  
 Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
  
 Міжнародний виставковий центр  
  
 Міжнародний комітет з неруйнівного контролю  
  
 Європейська федерація з неруйнівного контролю

**Основні теми конференції:**

- нові методи і технології неруйнівного контролю;
- моніторинг технічного стану і продовження експлуатаційного ресурсу об'єктів енергетики, нафто- і газопроводів;
- підвищення енергоефективності будівель та споруд;
- проблемні питання неруйнівного контролю в транспортній галузі;
- неруйнівний контроль дорожньої інфраструктури;
- стандартизація, підготовка і сертифікація персоналу;
- демонстрація сучасного обладнання для НКТД виробниками і постачальниками

**Важливі дати:**

Заявка на участь до 20.10.2019 р.

Оплата за участь до 31.11.2019 р.



Українське товариство неруйнівного контролю і технічної діагностики

**Адреса і телефони Оргкомітету:**  
**Адреса для листів:** 03150, м. Київ-150, а/с 187, УТ НКТД  
**Тел.:** (+380 44) 200-46-66, 205-22-49, 200-81-40, 205-21-96  
**e-mail:** usndt@ukr.net  
**інтернет:** www.usndt.com.ua