



# ИССЛЕДОВАНИЕ АЭ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

## Сообщение 1. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Л. М. ЛОБАНОВ, А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, А. А. ГРУЗД, Л. Ф. ХАРЧЕНКО

*Рассмотрены отдельные элементы методики испытания материалов конструкций при высоких температурах, связанные с особенностями технологии, основанной на применении метода акустической эмиссии (АЭ). С учетом этих особенностей на базе разрывной машины Р-20 изготовлен специальный испытательный стенд, включающий оригинальные средства нагрева и его контроля, средства регистрации АЭ, нагрузок и температур. Разработанные методика и стенд позволяют проводить испытания материалов тепловых и электрических станций, элементов конструкций атомной энергетики, оборудования химических и металлургических производств, работающих в диапазоне температур от 20 до 560°С с получением и анализом АЭ характеристик материалов. Приведена конструкция испытательного стенда.*

*Individual elements of the procedure of testing structure materials at high temperatures are described, which are related to the features of the technology based on application of the acoustic emission method (AE). Allowing for these special features a special testing facility was manufactured on the basis of R20 tensile testing machine, including ingenious means of heating and its control, means of recording AE, loads and temperatures. The developed procedure and facility allow testing materials of thermal and electric power stations, structural elements for nuclear power engineering, equipment of chemical and metallurgical productions, operating in the temperature range from 20 to 560°С with derivation and analysis of AE characteristics of materials. Testing facility design is given.*

Область использования метода АЭ постоянно расширяется. В частности, системами периодического и непрерывного АЭ контроля оснащают промышленные производства, на которых условия эксплуатации конструкций и технологического оборудования чрезвычайно разнообразны [1, 2, 6–10]. Это относится к химическим производствам и производствам энергетического профиля, где температуры могут изменяться в диапазоне от криогенных до весьма высоких, составляющих сотни градусов Цельсия, а иногда и выше.

Опыт ИЭС им Е. О. Патона НАН Украины в применении АЭ для определения состояния объектов, работающих при низких и нормальных температурах, показал, что методические трудности, связанные с установкой датчиков АЭ, проведением измерений и оценкой их результатов, могут быть эффективно преодолены. В частности, об этом свидетельствует позитивный опыт многолетней работы систем непрерывного АЭ мониторинга на изотермических резервуарах для хранения жидкого аммиака [3].

Металлические материалы в условиях работы при низких температурах более склонны к хрупкому разрушению [4], акустические сигналы в них распространяются достаточно хорошо, уровень их затухания незначителен, что позволяет охватывать большие площади контролируемой поверхности с использованием нескольких датчиков АЭ [3, 5].

Известно, что высокие температуры по-разному влияют на прочностные свойства различных металлов [2, 4], соответственно, АЭ при нагружении этих металлов также может существенно отличаться. Исследование в лабораторных условиях АЭ характеристик материалов при высоких температурах является необходимым этапом при переходе к периодическому, а затем непрерывному мониторингу объектов химических производств, поскольку на его основе создается методика контроля и нормативные материалы, передаваемые затем предприятиям, которые будут ее применять.

Результаты, полученные при высокотемпературных испытаниях материалов, могут также быть полезны при АЭ исследованиях процесса сварки. Учитывая разнообразие объектов, которые работают при высоких температурах в цехах химических производств, следовало выбрать ряд модельных материалов, наиболее часто используемых в конструкции предполагаемых объектов контроля, и испытать их в условиях нормальных и высоких температур с целью определения особенности их повреждаемости и формирования источников АЭ.

Одной из задач данного этапа исследований была разработка и изготовление стенда, а также методики АЭ испытаний образцов конструкционных материалов при высоких (до 560°С) температурах. При этом необходимо обеспечить измерение и текущий контроль температур с невысокой ошибкой (не более  $\pm 5^\circ\text{C}$ ) во время испытаний ука-

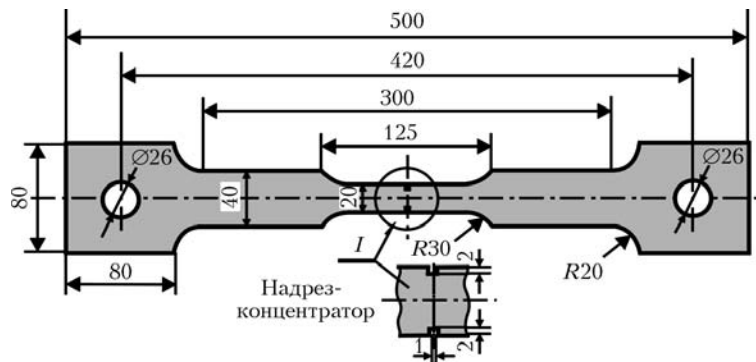


Рис. 1. Образец АЭ-01Р

занных образцов. Это позволит в дальнейшем исследовать зависимость и влияние высокотемпературного фактора на информационные АЭ параметры, по которым принимается решение относительно влияния развивающихся дефектов и оценка остаточного ресурса сварных конструкций. Указанные погрешности обеспечивались путем приварки термопар к поверхности испытуемого образца в месте концентратора.

В лабораторных условиях был разработан, изготовлен и смонтирован специальный испытательный стенд, в состав которого входят:

- разрывная машина Р-20;
- средства нагрева до температур вплоть до 560... 600 °С: специальное устройство электронагрева; нагрев при помощи стабилизированного пламени горелки, потребляющей природный газ и кислород;
- средства контроля температур: высокотемпературный (до 600 ±2°С) термометр; термопары; прибор «Triple-Display, Auto-Ranging M-3890D» (фирма «METEX» (Корея));
- контрольно-диагностический акустико-эмиссионный комплекс типа ЕМА-З, укомплектованный высокотемпературными и стандартными датчиками АЭ.

Для высокотемпературных испытаний материалов в качестве базовой была принята конструкция образца в соответствии с ДСТУ 4227-2003 с концентраторами в виде двух прорезей размером 1×2 мм (рис. 1). Для учета высокотемпературного

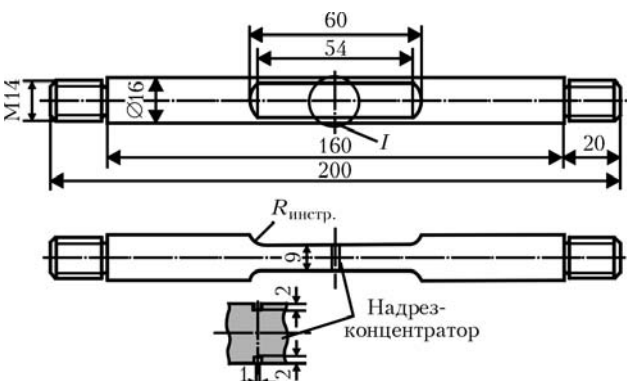


Рис. 2. Круглый образец с головкой диаметром 14 мм

фактора в средней части образца предусмотрена активная зона размером 125×20 мм.

Кроме того, использовали стандартные круглые образцы на статическое растяжение с такой же конфигурацией зоны контроля и концентраторами, аналогичными показанным на рис. 1. Использование данного типа образца (рис. 2) позволило выносить датчики АЭ на специально разработанные захваты, снижая температуру металла под датчиком при нагреве образца. В результате удалось достичь уровня температуры захватов порядка 60... 80 °С и использовать при измерении АЭ стандартные, а не высокотемпературные датчики.

С целью проверки соответствия конструкций образцов специфике проводимых испытаний, выбора мест установки АЭ датчиков, анализа распределения рабочих напряжений в активных зонах и определения зон кластеризации импульсов АЭ в различные моменты нагружения были проведены специальные исследования, предусматривающие периодические измерения продольной составляющей рабочих напряжений  $\sigma_x$  прод. в процессе нагружения образца из стали 09Г2С ( $\sigma_{0,2} = 320$  МПа).

На рис. 3 представлен в относительных единицах график распределения напряжений  $\sigma_x$  в различных сечениях активной зоны одного из подготовленных к испытаниям образцов. Измерения

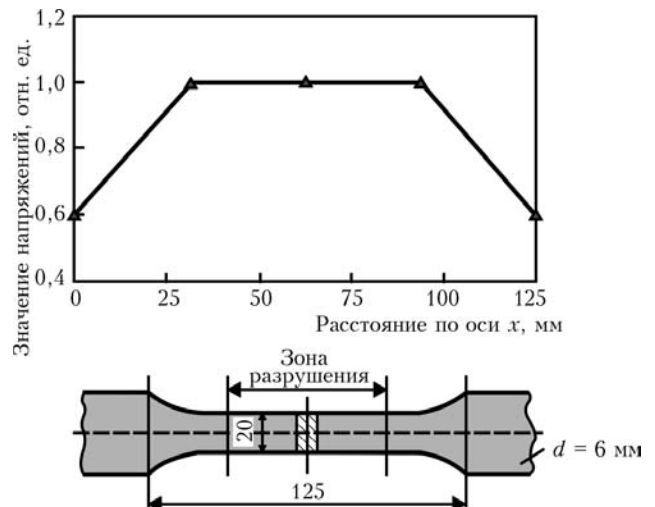


Рис. 3. Распределение продольных напряжений в активной зоне образца АЭ-01Р

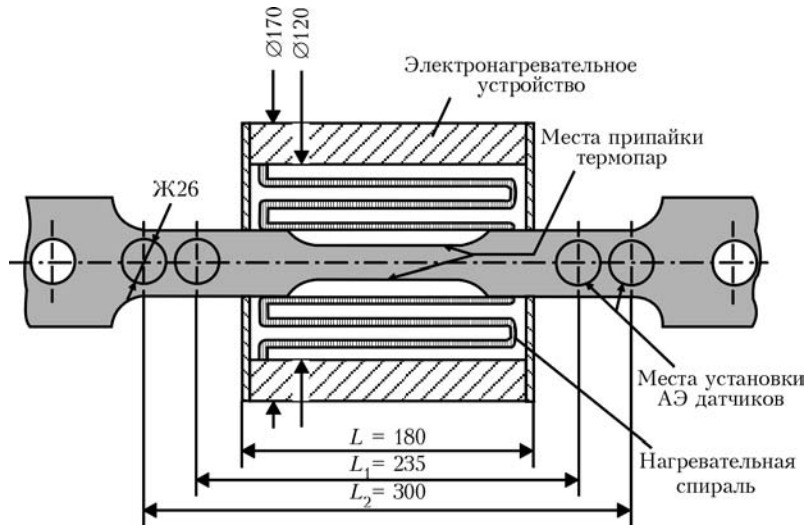


Рис. 4. Схема высокотемпературных АЭ испытаний образцов с использованием электронагревательного устройства

проводили при нагрузке  $P = 40 \cdot 10^3 \text{ Н}$  (4000 кгс). В нижней части рисунка представлен чертеж образца и обозначена зона, в пределах которой происходит разрушение.

При создании испытательного стенда отработывали различные способы нагрева рабочей части образцов. Следовало добиться равномерного распределения температур в рабочей части образцов и минимального нагрева мест установки датчиков АЭ.

На рис. 4 представлена одна из отработываемых схем высокотемпературных АЭ испытаний образцов, а именно схема с использованием специально изготовленного электронагревательного устройства. Предварительно изготавливали нормированные применительно к АЭ испытаниям стандартные образцы АЭ-01Р с размерами, указанными на рис. 1, с утоненной рабочей частью. В средней рабочей части образца монтировали нагревательное устройство и приваривали две термопары. Термопары тарировали в специальном устройстве с использованием высокотемпературного (до  $600^\circ\text{C}$ ) термометра. График тарировки представлен на рис. 5.

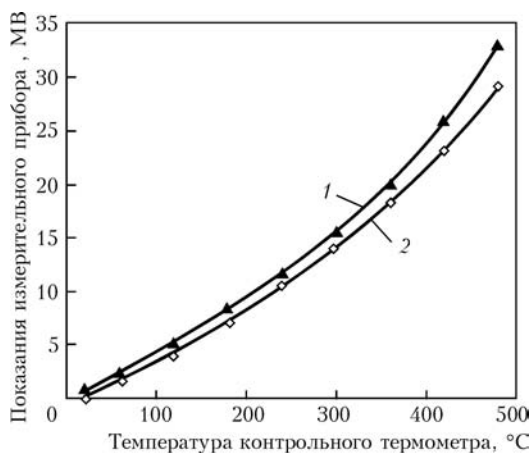


Рис. 5. Графики тарирования и измерения температуры: 1 — показания термопары, приваренной в образцу; 2 — тарировочный график термопары

АЭ датчики — по два с каждой стороны от рабочей части образца устанавливали в районе захватов разрывной машины (рис. 1). При испытании температуру в рабочей части образца поддерживали в диапазоне  $540 \dots 560^\circ\text{C}$ .

Испытания образцов по приведенной схеме показали, что температура нагрева АЭ датчиков верхнего захвата разрывной машины в течение длительного времени превышает  $120^\circ\text{C}$ , что ограничивает возможности данной схемы испытаний и работоспособность АЭ датчиков, особенно в условиях невысоких (до 500 кгс/мин) скоростей нагружения.

Кроме того, в этой схеме сдерживающим условием явилась необходимость поддерживать относительно постоянную высокую температуру в активной зоне образца. Измерения показали понижение этой температуры в процессе нагружения из-за необходимости отключения электропитания перед разрушением образца (рис. 6).

Недостатки использования разработанного электронагревательного устройства для термоис-

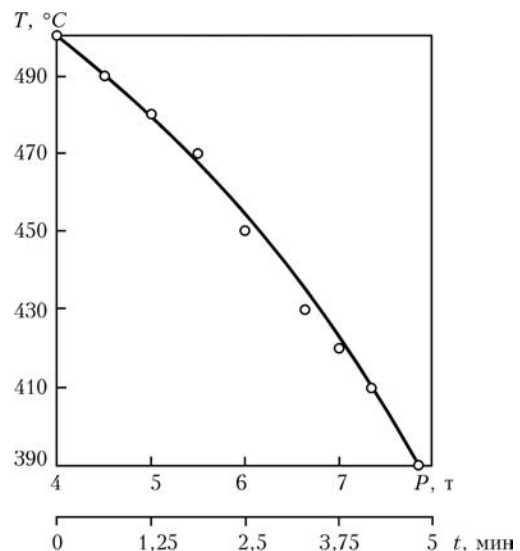


Рис. 6. График снижения температуры образца в процессе испытаний

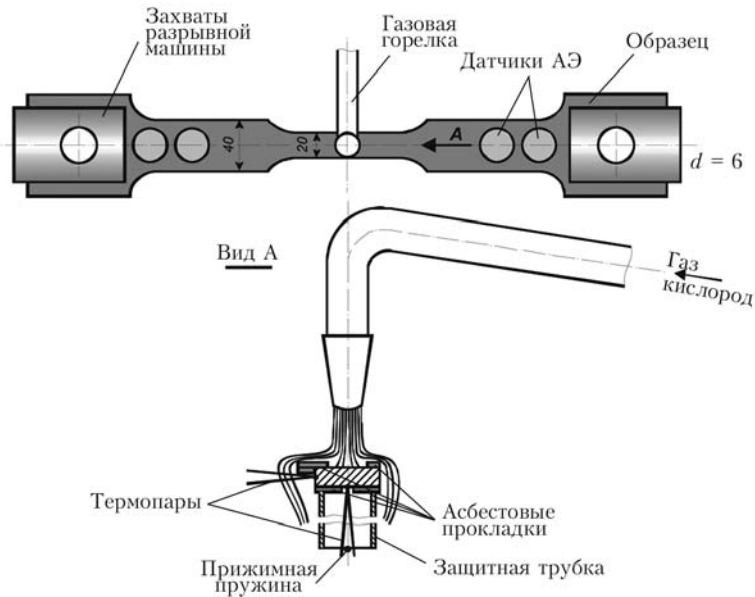


Рис. 7. Высокотемпературные АЭ испытания образцов точечным нагревом с использованием специальной газовой горелки

пытаний послужили основанием для разработки более эффективной методики нагрева образцов.

Схема испытаний с использованием точечного нагрева в центре рабочей зоны образца, выполняемого специализированной горелкой (рис. 7), показала большую эффективность.

Распределение температуры по длине образца (от его центра до датчиков), как показали специ-

ально проведенные измерения (рис. 8), позволяет оптимизировать места установки АЭ датчиков, т. е. вынести их в зону допустимых для их нормальной работы температур и не ограничивать скорость нагружения образцов. Кроме того, данная схема обеспечивает поддержание постоянной температуры в зоне точечного нагрева на протяжении всего процесса нагружения образцов.

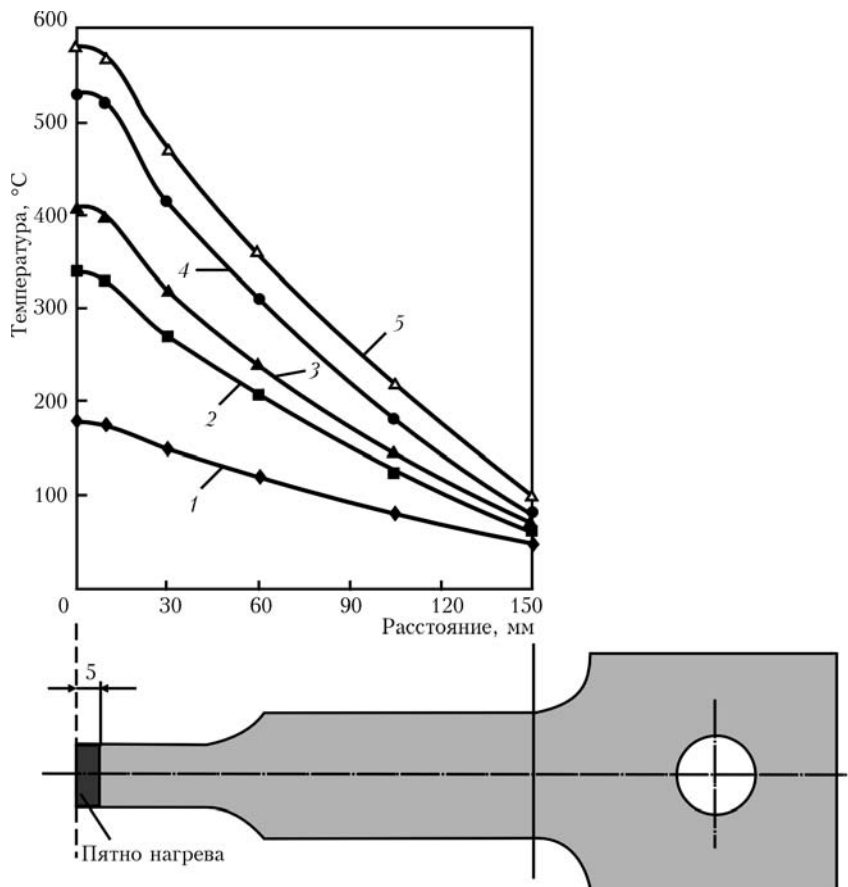


Рис. 8. Распределение температур по длине образца в зависимости от температуры пятна нагрева в его центральной части, °C: 1 — 180; 2 — 340; 3 — 410; 4 — 530; 5 — 580

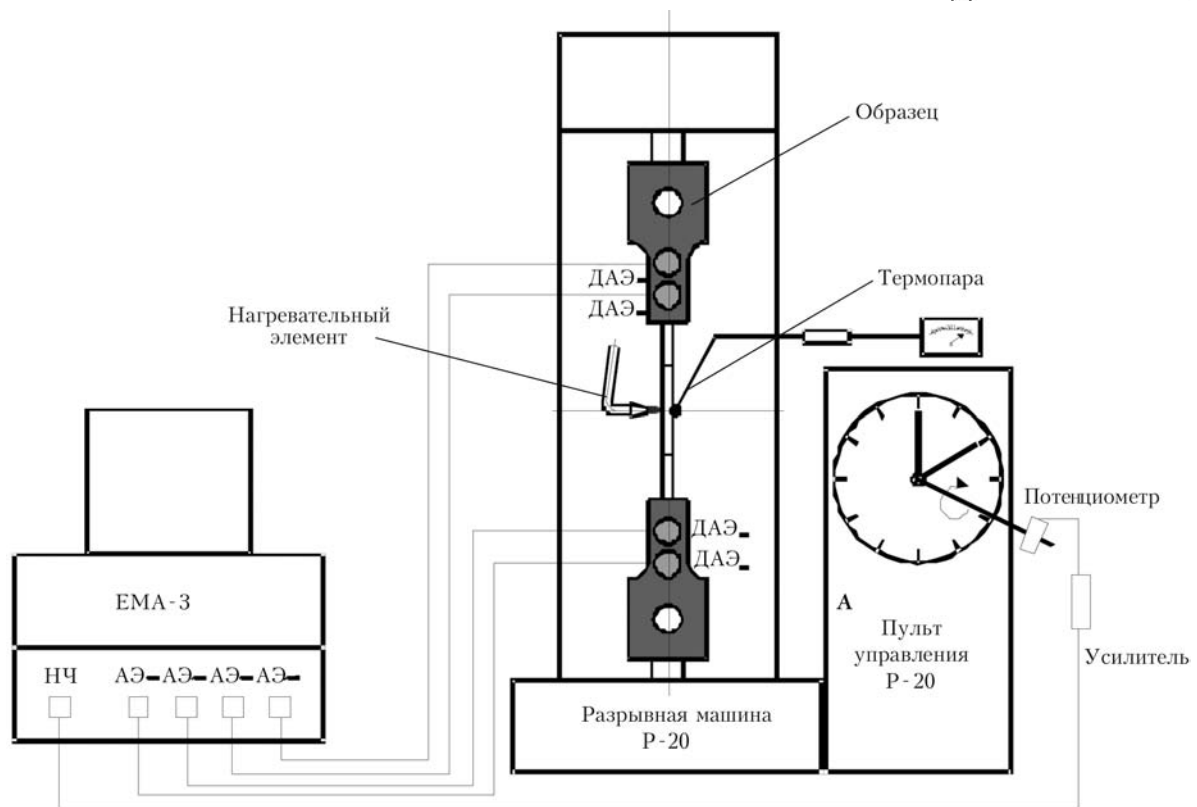


Рис. 9. Окончательная конструкция стенда для испытания образцов при высоких температурах

Следует также отметить то преимущество, что данная схема нагрева обеспечивает открытый доступ ко всей поверхности образца, приваренным термопарам и кабельным соединениям датчиков в течение всего процесса испытаний, что обеспечивает визуальный контроль и возможность корректировать процесс испытаний без их остановки.

Схема испытаний с использованием точечного нагрева позволяет также достаточно легко варьировать линейные размеры и сечение используемых образцов, а подвижность горелки позволяет исследовать акустические свойства испытуемых материалов при нагреве в области основного металла образца, зоны сварного шва или размещения концентратора.

Таким образом, достигнута необходимая универсальность, что позволяет в перспективе испытывать как различные материалы и элементы конструкций в условиях высокотемпературного стенда, так и оценивать влияние различных конструктивных особенностей на акустические свойства.

Испытательный стенд и схему высокотемпературных испытаний с использованием точечного нагрева в центре рабочей зоны образца (рис. 9) можно предварительно признать оптимальными для проведения опытных исследований конструктивных материалов с синхронной записью как параметров нагружения, так и параметров АЭ.

Результаты выполненных экспериментов и исследований позволили продолжить работы по специальной программе с целью набора статистических данных, обработки алгоритмов и програм-

многo обеспечения диагностических и мониторинговых АЭ систем, контролирующих объекты, которые работают в условиях высоких температур.

### Выводы

Выбран оптимальный способ нагрева рабочей части образцов для проведения высокотемпературных АЭ испытаний. На его основе создан специальный испытательный стенд, отработаны конструкции образцов и методика регистрации параметров испытаний.

Проведены предварительные анализы параметров нагружения образцов и распространения АЭ в условиях высоких температур, в том числе при наличии их градиента.

Выполненные работы и полученные результаты исследований позволяют начать испытания образцов и конструктивных элементов с целью набора экспериментальных данных по АЭ свойствам различных металлических материалов, работающих в условиях высоких температур.

1. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — № 10/11. — С. 7–13.
2. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 6–10.
3. Применение АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 3. — С. 85–95.
4. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справ. пособие / В. Т. Трощенко, А. Я. Красовс-



- кий, В. В. Покровский и др. — Т. 1. — Киев: Наук. думка, 1993. — 287 с.
5. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 3–11.
  6. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Инд-пром, 2008. — 812 с.
  7. Механические свойства металлов и сплавов. Справочник / В. А. Тихонов, В. А. Кононенко, Г. И. Прокопенко, В. А. Рафаловский. — Киев: Наук. думка, 1986. — 567 с.
  8. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справ. пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. — Киев: Наук. думка, 1981. — 583 с.
  9. Barna B. A., Johnson J. A., Allemeier R. T. Determination of acoustic-emission sites using a digital nondestructive-evaluation workstation // Exper. Mech. — 1988. — 28. — P. 210–213.
  10. Nunez L. R., Nishino H., Yoshida K. Acoustic emission waveform analysis of gas leakage on pipe with various types of artificial defects // 6th Intern. conf. on Acoustic Emission, 28 Oct.–2 Nov., 2007: Harveys Resort&Casino: South Lake Tahoe, Nevada, USA.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила в редакцию 14.01.2009

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ОКТЬ ИНСТИТУТА ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ»**

Продолжает плодотворное сотрудничество с крупнейшим в Европе производителем магистральных труб и железнодорожных колес ОАО «Выксунским металлургическим заводом» (Россия).



ОКТЬ ИЭС им. Е.О. Патона разработаны установки автоматического ультразвукового контроля (АУЗК) НК360-362 для неразрушающего контроля сварных швов и концевых участков труб диаметром от 508 до 1420 мм и толщиной стенки от 7 до 50 мм. Партию из шести таких установок ОКТЬ ИЭС поставило заводу в 2004–2005 гг. Они прошли зарубежную инспекцию по нормам DNVI, разрешившей участие ОАО «ВМЗ» в тендере на поставку труб для нефтепровода «Nord stream», в том числе по дну Балтийского моря.

Высокий рейтинг оборудования АУЗК позволил ОКТЬ ИЭС им Е.О. Патона вновь победить в международном тендере и получить заказ на поставку ОАО «ВМЗ»

в 2007 г. двух станций АУЗК железнодорожных колес, выпуск которых на заводе составляет почти треть мирового производства.

В июле 2008 г. две станции НК364 АУЗК ж/д колес (см. фото на обложке журнала) изготовлены и отправлены заказчику. Они предназначены для выявления нарушений сплошности типа флокенов, расслоений, завернувшихся и утонувших корочек, газовых пузырей, скоплений неметаллических включений, ликваций и других внутренних дефектов широкой номенклатуры колес, используемых на железных дорогах всего мира. Положительной особенностью является то, что контроль ведется одновременно по двадцати каналам на всех элементах колеса: ободу в осевом и радиальном направлениях, ступице, диске и гребне.

Станции НК364 зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений под № 38738-08 и допущены к применению в Российской Федерации, Сертификат UA.E.27.011.A № 32944, а также зарегистрированы в Реестре средств измерений, допущенных к применению в ОАО «Российские железные дороги». Свидетельство о регистрации № МТ 003.2009.

