

## О РАСПОЗНАВАНИИ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Л. И. МАРКАШОВА, О. С. КУШНАРЕВА

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Поставлена задача сопоставления параметров акустической эмиссии тем изменениям структуры, которую она сопровождает. Исследованы некоторые аспекты связи между изменениями микро- и макроструктуры стали 12Х1МФ в процессе развития разрушения. Разработаны методика исследований и конструкция образца, позволяющие эффективно исследовать связи параметров АЭ с изменениями структуры материала на различных стадиях развития разрушения. Полученные при растяжении образца данные АЭ сопоставлены с результатами металлографических исследований. Показано, что параметры акустической эмиссии, возникающей при деформировании материала, могут служить достаточно эффективными характеристиками изменения микро- и макроструктуры материала на различных этапах накопления повреждений и развития разрушения. Библиогр. 15, рис. 5.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, микро- и макроструктура стали, разрушения, металлографические исследования, накопление повреждений

Многочисленные исследования показывают, что при дискретном накоплении повреждений и развитии разрушения возникает акустическая эмиссия (АЭ), характер которой соответствует изменениям структуры материала [1, 2, 4–15]. Одной из важнейших практических задач является сопоставление параметров АЭ тем изменениям структуры, которую она сопровождает.

Дискретность разрушения хорошо подтверждается данными АЭ, получаемыми, в частности, при растяжении образцов. Отметим, что как материал, так и форма образца влияют на регистрируемую акустическую активность. Для поставленной в настоящей работе задачи – поиска подходов к идентификации по данным АЭ структурных особенностей накопления повреждений и разрушения материалов, более подходят такие материалы и конфигурации образцов, которые обеспечивают появление единичных событий АЭ на характерных стадиях деформирования и разрушения, что отмечалось в свое время в работе [6]. В то же время прогнозирование разрушения путем распознавания типовых групп событий АЭ [8] требует использования материалов и образцов с более высокой активностью, которая обеспечивает достаточное количество информации для статистической обработки. Это два различных подхода, и далее в данной работе рассматривается только первый.

Естественно, выявление связи АЭ с достаточно тонкими механизмами развития разрушения представляет собой сложную и комплексную задачу. В данной же работе на примере исследования только одного образца показано, что такая задача мо-

жет быть принципиально решена. Представленный на рис. 1 график испытаний стали 12Х1МФ, полученный при деформировании образца (рис. 2) с записью АЭ, вполне удовлетворяет поставленной цели. На графике приведены плавная кривая роста нагрузки  $P$  (кг) и возникающие в процессе деформирования единичные импульсы АЭ, свидетельствующие о дискретном характере процесса разрушения, происходящего как череда надрывов и нарушений сплошности структуры. Столбиками показаны амплитуды  $A$  зарегистрированных событий АЭ, точками прочие их параметры, а именно  $O$  – число осцилляций в сигнале АЭ;  $Rt$  – время нарастания АЭ сигнала (Райс тайм), мкс;  $X$  – координата места возникновения АЭ события.

В зависимости от свойств исследуемого материала преимущественными факторами развития разрушения могут быть возникновение пор при разрыве локальных связей между элементами структуры либо процессы, связанные с перемещением и скоплением дислокаций в определенных локальных областях материала. Как правило, при этом возникают значительные напряжения в зоне скопления и происходит образование микротрещин, последующее развитие которых приводит к разрушению. В большинстве случаев реализуется смешанный механизм разрушения. В данной работе за счет применения специально подобранной конструкции образца и выбора соответствующего материала удалось получить минимальный набор событий АЭ, каждое из которых может быть сопоставлено с определенным процессом при разрушении материала.

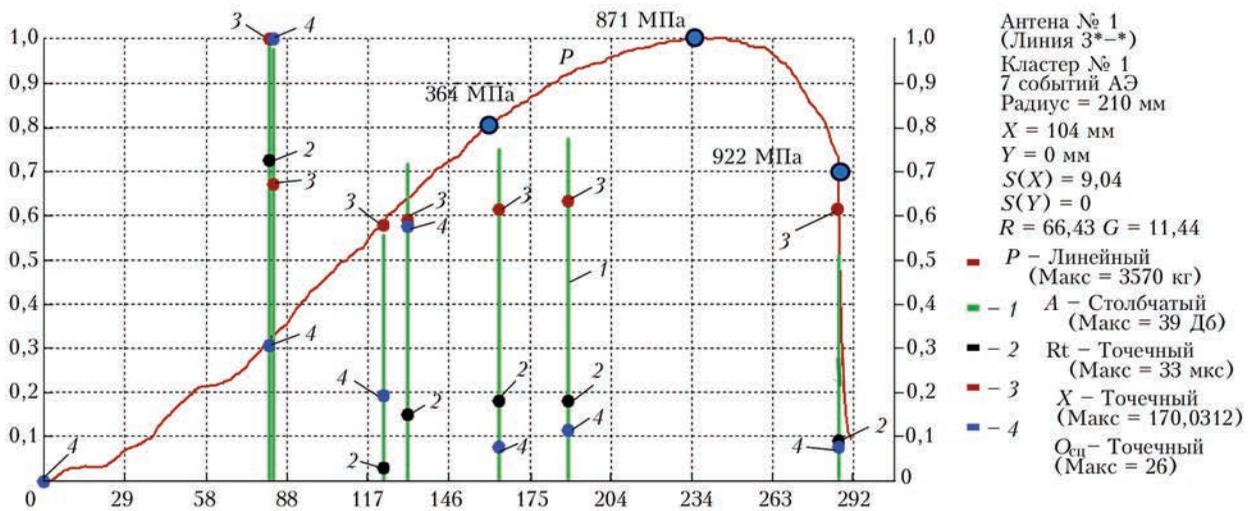


Рис. 1. Параметры АЭ сигналов в относительных единицах, полученные при испытании образца (рис. 2). Представлены номер локационной АЭ антенны и ее тип (в данном случае линейный), указан выделенный для анализа кластер радиусом 210 мм с координатой центра 104 мм. Погрешность определения центра кластера на базе 210 мм равна 9,04 мм. На кривых деформирования показаны истинные значения напряжений в МПа. На графике не представлены другие информативные параметры АЭ, такие как энергия, спектр, частоты, чтобы избежать затруднений при просмотре и анализе (база 210 мм)

Таким образом, в соответствии с поставленной задачей разработан специальный образец с плавным ослаблением в центре на длине 40 мм (рис. 2). Это позволило получить разные значения пластических деформаций в разных сечениях образца за счет изменяющегося диаметра, уменьшив таким образом число необходимых образцов и повысив качество результатов исследования.

Потребовалась также серьезная доработка существующей аппаратуры АЭ, особенно в области ее программного обеспечения, которое должно обеспечить достаточно сложную обработку АЭ сигналов с учетом требований распознавания изменений структуры. Для этого были созданы соответствующие алгоритмы, позволяющие не только проводить первичную обработку АЭ информации, но и комбинировать эту информацию в различных сочетаниях, позволяющих наиболее наглядно представлять результаты измерений. Таким образом, на рис. 1 представлен типичный график записи АЭ и дополнительной информации, получаемой при растяжении образца, и позволяющей анализировать результаты измерений, а на рис. 2 окончательно принятая для исследований конструкция образца. Последняя определялась возможностью за счет изменяющегося диаметра получить различную пластическую деформацию в каждом его сечении. Такой прием позволил в рамках одного испытания получить различные величины пластической деформации того же самого материала, обеспечив идентичность материала

в разных сечениях. В противном случае пришлось бы испытывать и резать с целью последующих металлографических исследований несколько образцов.

Растяжение образца осуществляли на разрывной машине Р-20<sup>1</sup>. АЭ датчики устанавливали на захватах по обе стороны образца на расстоянии 138 мм. Результаты испытаний, представленные на рис. 2, получены с использованием данных рис. 1, из которого определены необходимые параметры АЭ. В соответствии с ними на образце установлены координаты импульсов АЭ с указанием последовательности их появления.

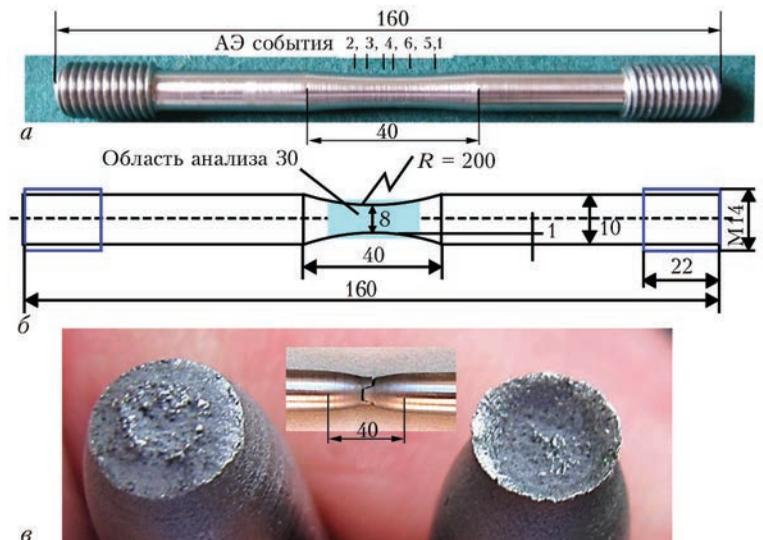


Рис. 2. Образец для испытаний на растяжение из стали 12Х1МФ (а) и его чертеж (б). На образце показаны места и последовательность появления АЭ событий 1–6. Место разрушения с образовавшейся шейкой (четко видна линия разделения образца) и поверхность разрушения с хрупкой в центре и пластической по контуру частями (в). Точное время и место возникновения каждого события АЭ см. на рис. 1

<sup>1</sup>Настройка испытательного оборудования и испытание образца были выполнены с участием Ю. А. Смоголя

Полученные импульсы характеризуются различным числом осцилляций. Проведенные металлографические исследования позволяют предположить, что для данного образца число осцилляций напрямую коррелирует с изменениями в структуре материала, связанными, в первую очередь, с дискретным перемещением групп дислокаций.

Первое событие АЭ характеризуется появлением восьми таких перемещений. Второе событие АЭ возникло позже и сопровождалось пятью скачками перемещений. Его координата практически симметрична координате первого события относительно центра разрушения и находится с левой стороны (см. рис. 2). Третье событие произошло несколько правее второго и насчитывало 15 осцилляций. В этом случае дислокации продвигались значительно интенсивнее. Четвертое, пятое и шестое события явились завершающими и содержат всего две, три осцилляции. Далее произошло разрушение и шестое событие АЭ строго совпало с местом разрушения образца. Точное расположение событий по времени и координатам на образце представлены на рис. 1. Там же можно видеть и время нарастания сигнала АЭ события в каждом конкретном случае ( $Rt$ ).

Отметим, что для данного эксперимента характерно снижение длительности и частоты зарегистрированных событий АЭ по мере деформирования образца. На рис. 3 показана диаграмма, где точками представлены указанные параметры, обозначенные соответственно  $w$  (мкс) и  $F$  (кГц). Каждый последующий скачок изменений структуры приводит к появлению более короткого по длительности события АЭ с меньшей частотой. Это свидетельствует о влиянии пластической деформации на тип и характер возникающих в процессе деформи-

рования повреждений. При наличии необходимой статистики, которая может быть подтверждена при достаточно большом числе испытаний, аналогичных проведенному, изменения данных параметров могут быть использованы в качестве характеристик достижения материалом соответствующих стадий деформирования. В то же время не исключено, что данная особенность присуща только конкретному образцу. В этом случае потребуется дальнейший, более детальный анализ по сопоставлению зарегистрированных сигналов АЭ возникшим в материале повреждениям.

В целом малое число зарегистрированных событий АЭ свидетельствует о том, что механизм разрушения образца ближе к хрупкому, нежели к вязкому, особенно в центральной части образца, хотя чисто хрупким он не является, о чем свидетельствует наличие шейки. Об этом же свидетельствует характер излома, сфотографированного после разрушения. Металлографический анализ вносит в полученную картину разрушения и возникновения в его процессе сигналов АЭ необходимую ясность. На рис. 4 показана микроструктура поперечных сечений образца в местах появления АЭ событий.

Напомним, что хрупкое разрушение характеризуется преимущественно дислокационным механизмом повреждаемости, следствием которой является скачкообразное возникновение трещин. Данный механизм существенно отличается от разрушения вязкого, при котором наблюдается постепенное возникновение, рост и последующее соединение большого числа несплошностей типа пор. Трещины при таком механизме возникают в наиболее ослабленных порами участках материала.

В случае испытания образца, рассматриваемого в данной работе, преимущественным явлением при деформировании образца является возникновение и рост дислокационных полей, хотя наблюдаются и четко просматриваются также отдельные поры. Таким образом, выбранный модельный материал позволяет исследовать смешанный механизм разрушения, в котором преобладает хрупкий компонент.

Рассматривая последовательно изменение микроструктуры с увеличением величины пластической деформации, видим все более значительное увеличение скопления дислокаций на каждом последующем этапе деформирования. Величину пластической деформации  $\epsilon^*$  вдоль оси образца (рис. 5) рассчитывали по изменению диаметра образца после разрушения по формуле  $\epsilon^* = 2\epsilon_{\text{поп}}$ , где  $\epsilon_{\text{поп}}$  – поперечные пластические деформации [3]<sup>▲</sup>.

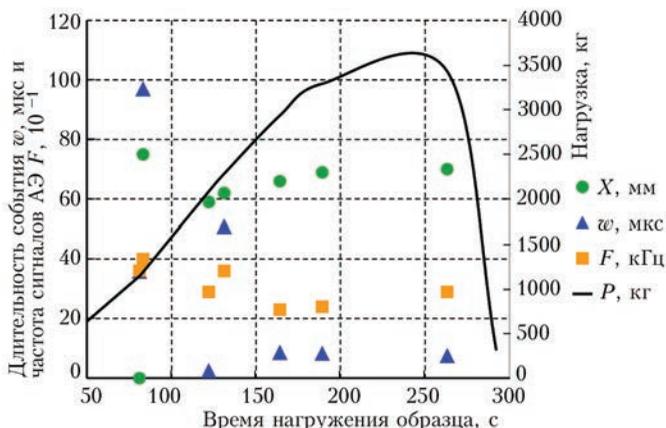


Рис. 3. Длительность  $w$ , координата  $X$  и частота  $F$  сигналов АЭ при деформировании образца, сопоставленные с кривой нагружения  $P$ . Видна четкая тенденция к снижению обоих параметров по мере деформирования: длительности сигнала в 10 раз, частоты более чем в 1,5 раза. База 140 мм

▲Интегрирование функции распределения пластических деформаций (рис. 5) позволило определить общее удлинение образца после разрушения путем суммирования элементарных деформаций в каждом его сечении. В результате интегрирования получена величина  $\Delta l = 2,6$  мм. Прямые замеры по удлинению образца показали величину  $\Delta l = 2,9$  мм.

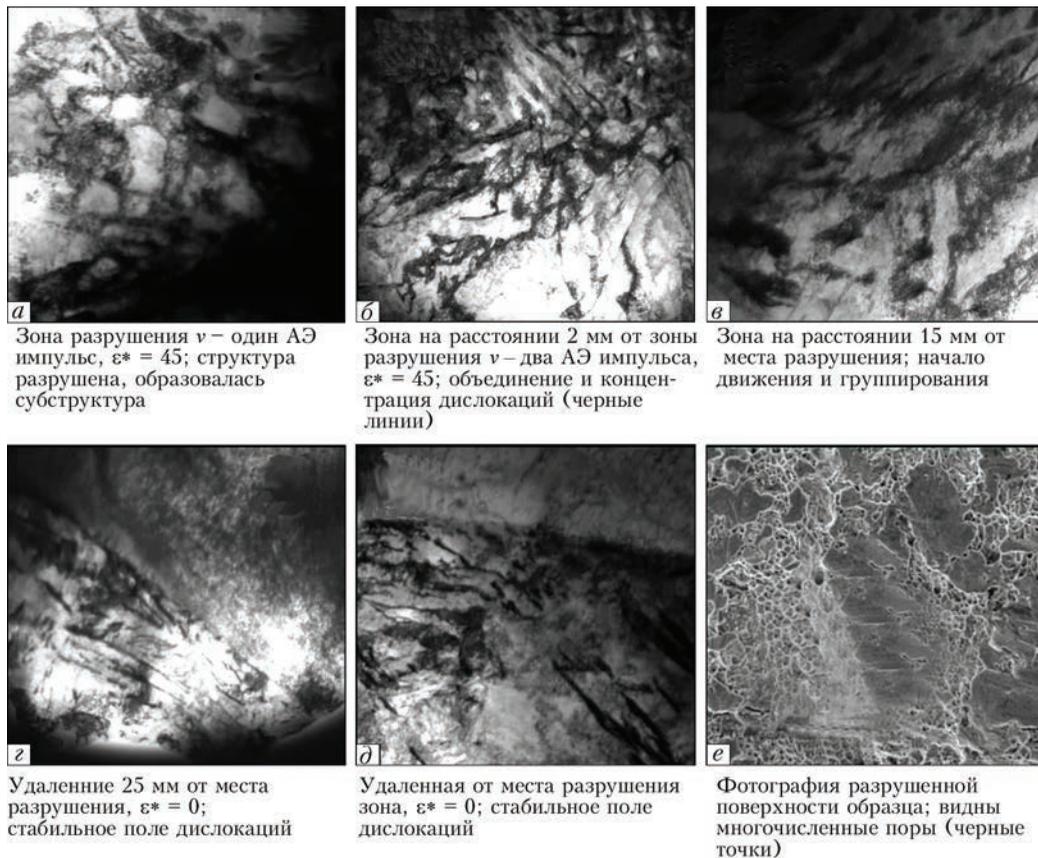


Рис. 4. Микроструктура в поперечных сечениях образца, определенных АЭ (а–б). Видны скопления дислокаций (черные линии) и их перераспределение в результате пластической деформации; г, д – структура материала в исходном состоянии, когда пластические деформации отсутствуют,  $\epsilon^* = 0$  [3]

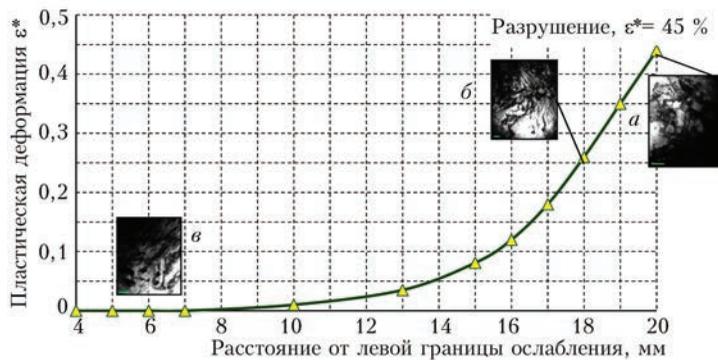


Рис. 5. Распределение пластических деформаций в образце после разрушения и связанные с ними изменения микроструктуры материала в поперечных сечениях в зависимости от величины этой деформации (а–в на рис. 4)

Проведенный металлографический анализ подтверждает данные АЭ о реализованном в процессе деформирования образца механизме разрушения.

Настоящая работа показывает, что обнаруживаются четкие взаимосвязи параметров АЭ с изменениями структуры материала. Полученных данных сейчас недостаточно для того, чтобы вывести общие закономерности этих изменений. Основным результатом работы является то, что примененными методами такие изменения отслеживаются и могут быть использованы в дальнейшем

при оценке изменений структуры материалов неразрушающим методом.

### Выводы

Появление событий АЭ в процессе деформирования образца весьма точно соответствует изменениям структуры материалов, коррелирующим, в свою очередь, с величиной пластической деформации.

На участках образца, расположенных вне зоны утонения и деформировавшихся преимущественно в упругой области, АЭ и существенных изменений структуры не наблюдается.

Показано, что разрушение стали 12Х1МФ происходит по смешанному механизму, с некоторым преобладанием хрупкого над вязким.

Основным фактором, приведшим к разрушению исследуемого образца, послужило поэтапное развитие полей скопления дислокаций, приведших к образованию субструктуры, микротрещин и небольшого числа пор, с последующим переходом к росту макротрещины в центральной части образца.

Примененные алгоритмы и программное обеспечение для систем АЭ диагностики типа ЕМА представляются на первом этапе исследований вполне

достаточными для получения и анализа акустической и сопутствующей информации, необходимой для оценки процессов накопления повреждений в деформируемом материале и его разрушении.

1. Андрейкив А. Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Р. В. Лысак. – К.: Наукова думка, 1989. – 176 с.
2. Лебедев А. А. Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов. – К.: Препринт ИПП НАН Украины, 1998. – 43 с. – (Препринт/НАН Украины, ИПП).
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
4. Недосека А. Я. Влияние характера локальных изменений структуры материала на формирование упругих волн деформаций на поверхности толстой пластины / А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 66–73.
5. Недосека А. Я. О квантовании процесса возникновения и развития трещин / А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1989. – № 1. – С. 11–15.
6. Чаусов Н. Г. Влияние вида напряженного состояния на параметры акустической эмиссии на заключительных стадиях деформирования металлов / Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, А. А. Лебедев // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1993. – № 3. – С. 18–23.
7. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека; под ред. Б. Е. Патона. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Индпром, 2008. – 814 с.
8. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии / С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
9. Недосека А. Я. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С. 7–17.
10. Скальський В. Р. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії / В. Р. Скальський // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 4. – С. 29–36.
11. Balderston H. L. The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena / H. L. Balderston // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 297–317.
12. Stone D. E. Acoustic Emission parameters and their interpretation / D. E. Stone, P. F. Dingwall // NDT international. – 1977. – 10. – P. 51–56.
13. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission / P. P. Gillis // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 20–29.
14. Tetelman A. S. Acoustic emission testing and micro cracking processes / A. S. Tetelman, R. Chow // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 30–40.
15. Tatro C. A. Design criteria for acoustic emission experimentation / C. A. Tatro // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 84–113.

A task was set to compare acoustic emission parameters with those structural changes, which it accompanies. Some aspects of the connection between changes in micro- and macrostructure of 12Kh1MF steel during fracture propagation were studied. Investigation procedure and sample design were developed, which allow effective study of the connections between AE parameters and changes of material structure at different stages of fracture propagation. AE data derived at sample tension were compared with the results of metallographic studies. It is shown that parameters of acoustic emission arising at material deformation, may be quite effective characteristics of the change in material micro- and macrostructure at different stages of damage accumulation and fracture propagation. 15 References, 5 Figures.

*Keywords: acoustic emission, micro- and macrostructures of steel, fractures, metallographic studies, damage accumulation*

*Поступила в редакцию  
28.09.2016*

**ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА НАНУ,  
МГП «ИНДПРОМ» ПРЕДСТАВЛЯЮТ  
ПРИБОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ  
ДЛЯ СИСТЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**



Базовые 4- и 16-канальные приборы  
EMA-4/4 и EMA-4/16

Приборы разработаны на основе устройств SENSOPHONE (Géreb és Társa, Венгрия). Системы ЕМА предназначены для периодического контроля и непрерывного мониторинга состояния трубопроводов, сосудов давления, хранилищ, оборудования производств различного назначения с индикацией степени опасности и прогнозом разрушения.



ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, МГП «Индпром»:  
(044) 200-66-46, (044) 205-25-88; inpat59@ukr.net

