

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Л. И. МАРКАШОВА, Т. А. АЛЕКСЕЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Интенсивное применение акустической эмиссии в оценке состояния эксплуатирующихся конструкций приводит к необходимости дальнейшего развития методов, основанных на этом явлении, применительно к расчетам прочности контролируемого материала. Некоторые методики в этом направлении уже созданы, освоены и успешно используются при длительном мониторинговом контроле. Однако особенности условий эксплуатации конструкций, их разнообразие по формам и материалам, а также рост требований к точности и надежности оценок приводят к необходимости продолжения исследований в данном направлении. Особенно существенным это становится в настоящее время, когда большое значение начали приобретать системы непрерывного мониторинга технического состояния конструкций. Библиогр. 40, рис. 9.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, пластическая деформация, методика оценки накопления повреждений, расчет прочности, мониторинг, разрушение

Анализируя акустическую эмиссию (АЭ), возникающую при разрушении материалов, исследователи пришли к выводу, что последняя связана с быстрой перестройкой структуры материалов в результате их деформации под воздействием возбуждающих полей. Данные, полученные с помощью АЭ, подтверждают это явление и позволяют оценивать изменения структуры материалов, возникающие в процессе деформирования либо эксплуатационной наработки. В материалах при этом образуются и накапливаются повреждения [1–29]¹. В настоящее время оценка поврежденности используется как в расчетах прочности, так и в приближенных качественных оценках, где ожидается изменение структуры материалов под действием любых силовых или других полей [4, 5, 12, 30–38]. В связи со все увеличивающимся объемом применения акустической эмиссии для оценки состояния материалов конструкций встает вопрос о более строгом нормировании информации АЭ, возникающей при развитии разрушения. Современные способы представления АЭ информации существующей измерительной аппаратурой требуют оригинального подхода при ее применении и создания соответствующих методик для того, чтобы выделить из всего потока АЭ информации определенную часть, которая характеризует развитие разрушения и может быть нормирована по вполне определенным параметрам. Многолетние исследования в этом направлении позволили сформулировать такие параметры, дать им оценку существующими методами физического анализа и применить при диагностиче-

ском контроле состояния материалов конструкций в процессе эксплуатации.

На первом этапе исследований по применению АЭ для оценки состояния материалов на основе стандартов технической диагностики [26] была разработана методика построения параметров АЭ, которые могут быть использованы при создании необходимых алгоритмов контроля. На базе этой методики была доработана аппаратура ЕМА (Evaluation of Materials Ability), которая получила маркировку ЕМА 3.91 и позволила после специальной обработки сигналов АЭ получить вектор состояния материала (ВСМ) более широкого состава, различные комбинации которого строятся программой автоматически в зависимости от создавшейся в процессе разрушения ситуации. ВСМ включает следующие АЭ параметры.

Измеренные параметры

1. Внешние силовые поля: P – текущая нагрузка, кг; давление, МПа; T – температура, °С.
2. A_c – суммарная амплитуда событий АЭ за время испытаний; характеризует общий объем образовавшихся повреждений, дБ.
3. N_c – накопленные в процессе разрушения события; характеризуют общее число повреждений, возникших за рассматриваемый промежуток времени; может не совпадать с O_c .
4. O_c – суммарное число повреждений в материале за рассматриваемый промежуток времени.

Построенные параметры (на базе измеренных)

5. $R_i(w)$ – время нарастания наибольшего в сумме событий АЭ сигнала или его длительность,

¹ Под повреждениями здесь понимаются любые изменения в структуре материалов. Динамическую составляющую этих изменений регистрирует акустическая эмиссия.

(мкс); характеризует упрочнение материала в процессе его деформирования.

6. A – максимальная амплитуда наибольшего в рассматриваемый момент времени события, дБ; условно характеризует объем образовавшегося дефекта.

7. A^2 – характеризует энергию, затраченную на образование дефекта, (дБ)².

8. $Aс^2$ – характеризует суммарную энергию, затраченную на разрушение образца, (дБ)².

9. O – число осцилляций в событии АЭ; характеризуют количество повреждений, возникших в данный момент времени.

10. N – сумма событий в рассматриваемый момент времени; характеризует число дефектов, возникших в данный момент времени; может не совпадать с $Oс$.

11. X – координата суммы событий, возникших в рассматриваемый момент времени.

Как видим, ВСМ состоит из параметров АЭ двух видов – параметры, претерпевшие специальную обработку для более наглядного с точки зрения принятия решения вида и параметры, непосредственно измеренные аппаратурой и позволившие завершить процедуру формирования ВСМ. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Для нормирования АЭ параметров были проведены специальные исследования с анализом методом металлографии материала образцов из стали X18Н9 в соответствии с информацией АЭ, получаемой при испытаниях, и в зависимости от уровня пластической

деформации, возникающей в каждом исследуемом сечении (рис. 1). Спектрограмма исследования состава стали, принятой для исследований, подтвердила марку стали – X1Н9 (рис. 2). Были выбраны специальные образцы, которые при растяжении на разрывной машине давали различную деформацию на разных участках образца. Это позволило на одном образце получить всю картину пластических деформаций, возникающих при его разрушении. Последнее важно еще и по той причине, что в значениях АЭ материалы настолько неоднородны, что получать среднее значение показателей АЭ в зависимости от количества образцов становится просто невозможным. В этом случае, как показал опыт работы, необходимы другие специальные методы обработки поступающей информации.

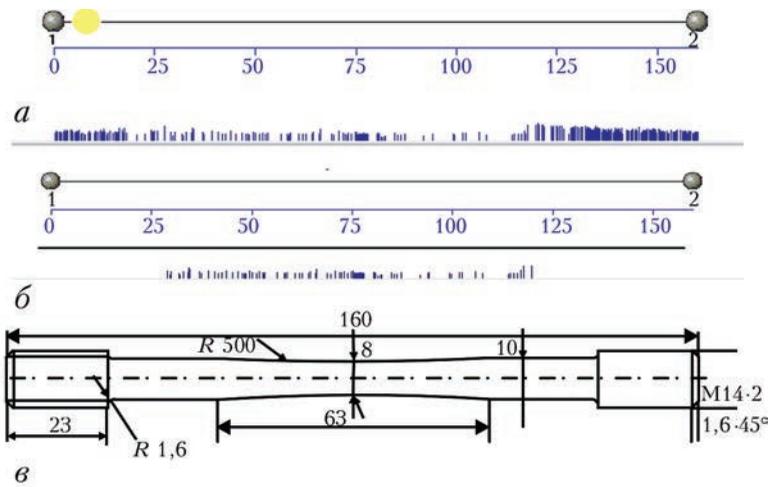


Рис. 1. Образец для проведения исследований с ослабленной областью 63 мм: а – распределение АЭ событий по всей длине образца; б – распределение событий АЭ на ослабленной части; в – конструкция образца

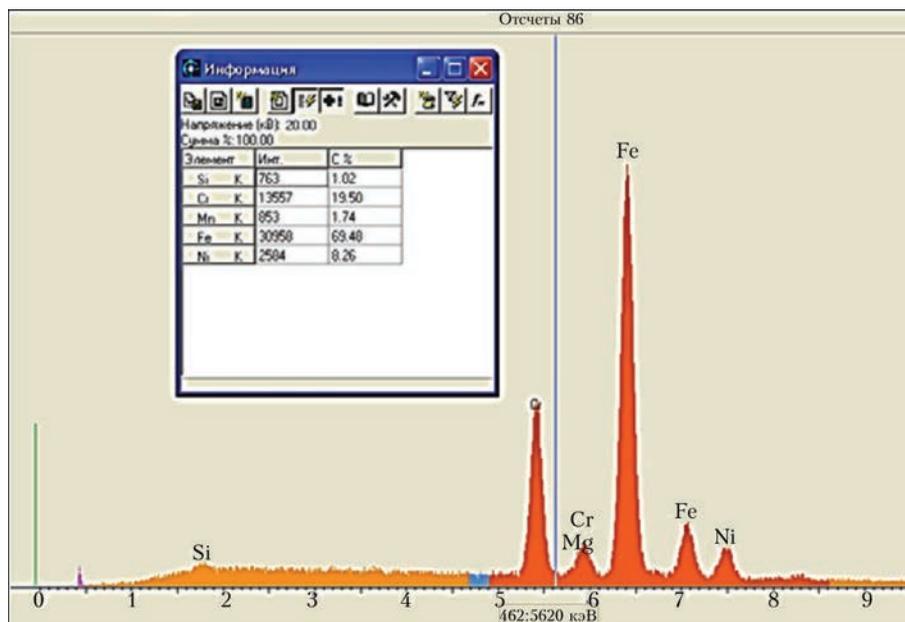


Рис. 2. Спектрограмма состава исследуемой стали

АЭ исследованиям подвергалась ослабленная область образца. В данном случае 63 мм. Изучалось распределение АЭ событий, накопившихся в выделенных для анализа зонах образца (кластерах) в процессе разрушения и их амплитуда (столбики по длине образца) (рис. 1, а-в) Картина АЭ активности представлена на рис. 3. Растяжение образца осуществлялось на разрывной машине с винтовым приводом. Это давало возможность получить полную деформацию образца в закритической области, что практически невыполнимо на машинах с гидравлическим приводом.

Анализируя графики рис. 2, можем видеть, что АЭ информация появляется сразу с началом разрушения. Каждое событие АЭ, прошедшее в указанное на оси абсцисс время, на графике отмечается ординатой амплитуды, дБ, ее координатой по длине образца мм (на графике черные точки); далее указывается время протекания события (сиреневые столбики) w , мкс; сумма укрупненных событий на данный момент времени N (столби-

ки зеленого цвета) и сумма реальных событий O_c (темно синяя кривая); там же записан график текущей нагрузки (темно красная кривая), кг. Как видно из графика АЭ возникает в образце неравномерно, что говорит о сложной неоднородной структуре материала образца и наличии напряжений третьего рода, приводящих в движение имеющиеся в материале дефекты. Видно, что амплитуда событий АЭ и время их протекания все время меняются, показывая, что образуются повреждения различного размера, и их образование происходит за разные промежутки времени. Следует полагать, что в процессе деформирования осуществляется упрочнение материала (наклеп), что отражается на времени протекания процесса образования повреждения. Сам процесс накопления повреждений происходит неравномерно. Интересно отметить, что кривая накопления повреждений (O_c) практически, с некоторыми отклонениями, повторяет кривую нагрузки. На графиках рис. 3, б) наблюдается та же закономерность, только в мень-

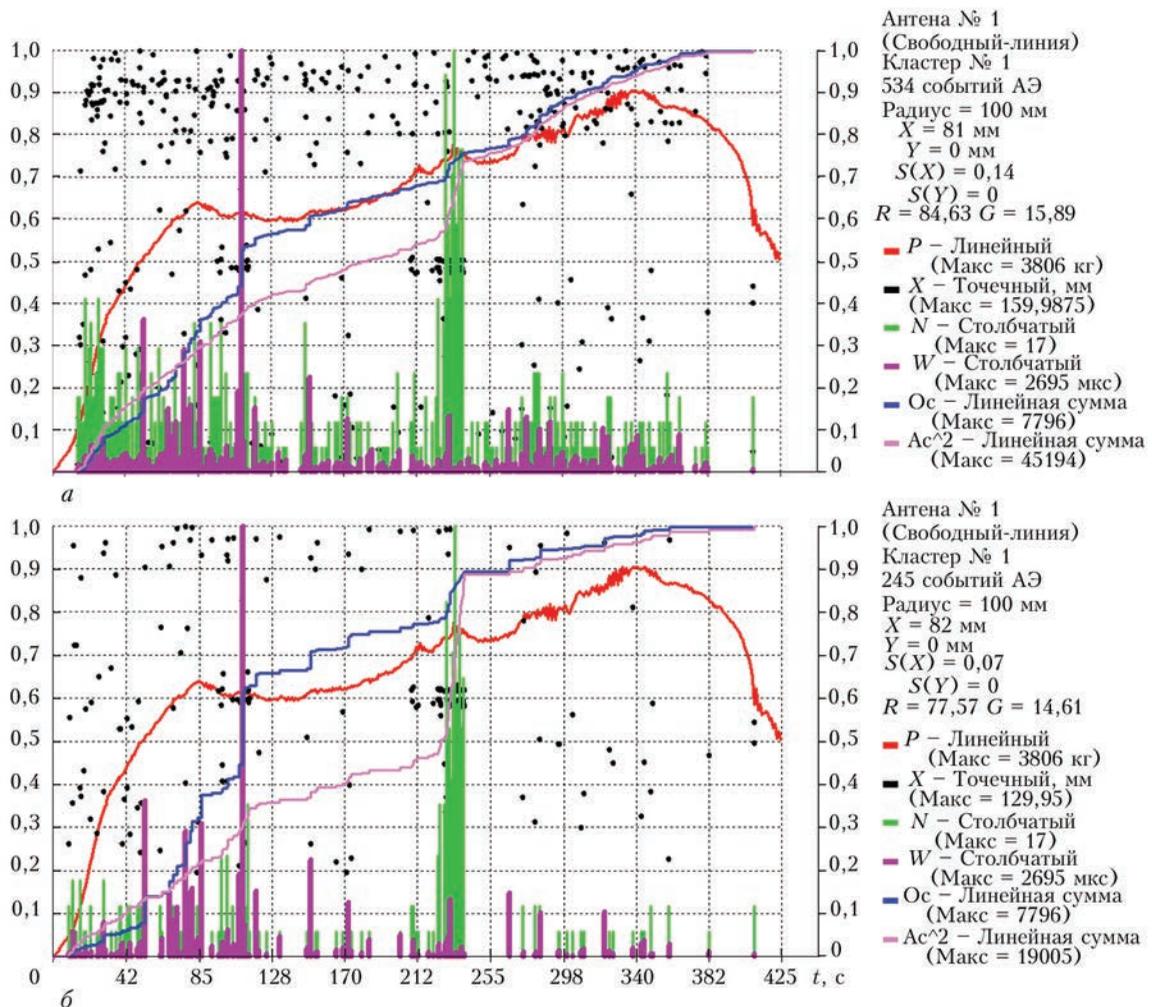


Рис. 3. Распределение АЭ информации в образце из стали X18H9, полученной прибором ЕМА3.91: а – по всему объему образца в зависимости от времени; область контроля 0...160 мм включает резьбовые соединения в захватах разрывной машины; б – в части области контроля 25...130 мм (выделена во избежание влияния на исследуемую часть образца АЭ информации, возникающей в резьбе). Значения всех параметров АЭ представлены в таблице справа. Обозначения соответствуют приведенным выше; $S(X)$ – ошибка определения координаты X , мм

шем масштабе, в связи с более узкой областью сьема информации.

Рассмотрим более подробно все этапы деформирования образца в промежутке времени от начала нагружения до разрушения. Первый этап выделим по времени от 0 до 160 с. Как видно из рис. 3, б нагрузка круто растет (красная кривая). Через несколько секунд после начала нагружения появляются первые повреждения структуры (зеленые столбики). Повреждения появляются практически во всей контролируемой области (черные точки на графике). В конце этапа наблюдается сосредоточение повреждений в области самого малого диаметра образца. Количество повреждений в момент времени 105 с резко возрастает. Общее число повреждений также растет (темно синяя кривая на графике). Разные величины деформаций регистрирует время протекания АЭ события (сиреневые столбики на графике). Количественные значения нагрузки Р и АЭ параметров определяются путем умножения их максимальных величин, указанных в скобках таблицы с правой

стороны графика, на значение относительной величины на оси ординат. На следующем этапе от 160 до 200 с нагрузка растет незначительно, протекают пластические деформации, видно упрочнение металла (сиреневые столбики резко уменьшили свою величину). Количество повреждений увеличивается незначительно. Сами повреждения образуются за значительно меньший отрезок времени, чем на предыдущем этапе. Упрочнение материала продолжается. Второй всплеск роста количества повреждений (столбики зеленого цвета), сопровождающийся также резким подъемом энергии, затраченной на образование повреждений (розовая кривая), наблюдается в диапазоне 224...239 с. В этом случае они практически все сосредоточены в области формирующейся шейки, черные точки группируются в районе будущей шейки. Наблюдается дальнейшее упрочнение материала (темно синие столбики параметра w). На этапе от 270 до 320 с нагрузка медленно растет. Размеры повреждений нестабильны. Сами повреждения начинают распределяться по всему

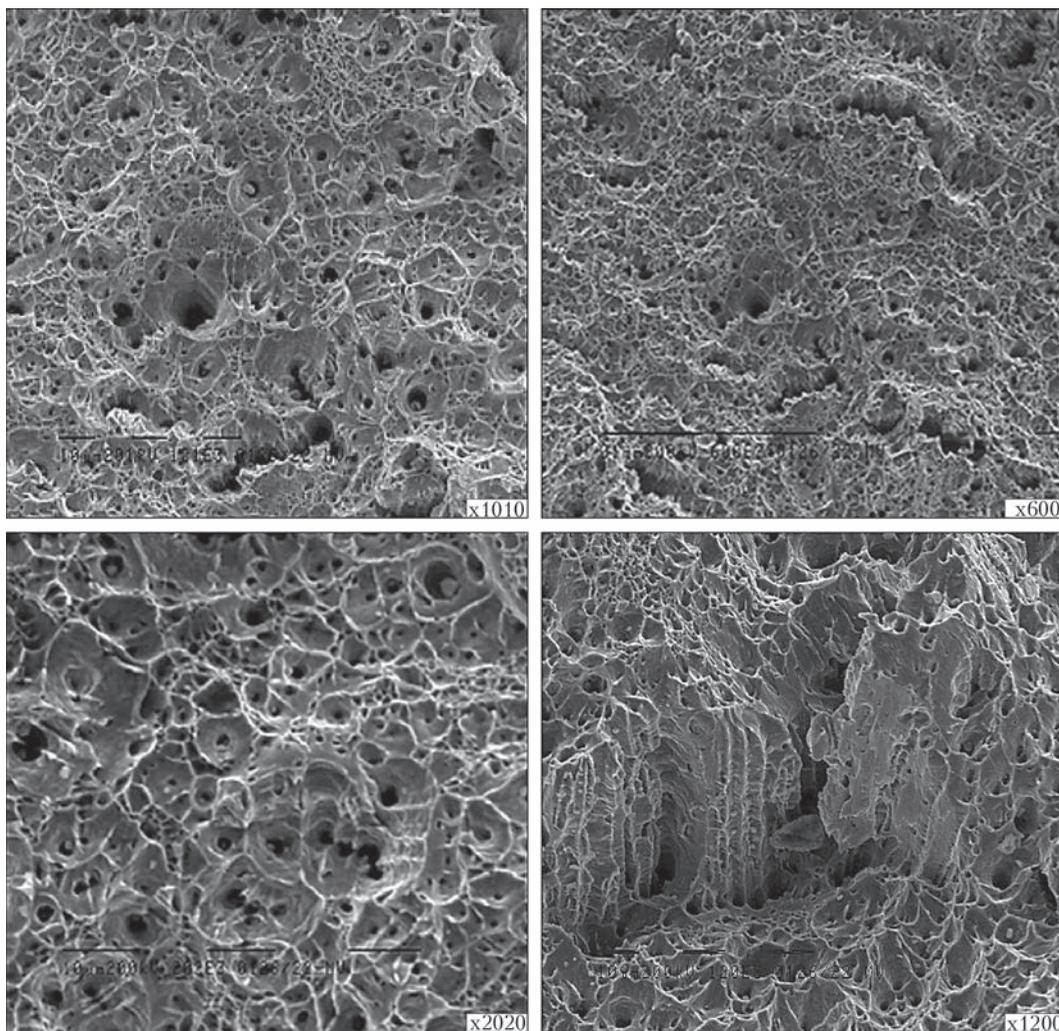


Рис. 4. Фрактограммы разрушенной поверхности образцов из стали X18H9 с многочисленными порами диаметром 1...12 мкм. Пластическая деформация в момент разрушения составила 100 %. Фрактограмма с увеличением $\times 1200$ получена при съемке, когда поверхность среза была наклонена

объему деформируемого материала. Параметр w показывает, что жесткость образования повреждений увеличивается. Этап 320 до 413 с характеризует закритическую область разрушения. Здесь количество повреждений растет незначительно, жесткость их образования стабильно высокая, на 413 с происходит разрушение, сопровождающееся всего двумя событиями АЭ, что говорит о том, что в конечном счете стало достаточным образоваться двум дефектам, чтобы подготовленная всем предыдущим ходом разрушения самая слабая поверхность сечения образца разрушилась. Разрушенные поверхности образца насыщены громадным количеством повреждений в виде пор (рис. 4). Поры распределяются практически также по всему объему материала в районе шейки. Рис. 5, *a* показывает, что поры вышли на поверхность образца на достаточно большом удалении от места разрушения.

На следующем этапе исследований была проанализирована микроструктура материала в местах разрезки образца и сопоставлена с показаниями АЭ. Для подтверждения связи данных АЭ с реальной ситуацией в материале образца были проведены разрезы в местах, указанных АЭ и представленных на рис. 6, *a*. Для этой цели было проведено укрупнение расположения АЭ событий путем кластеризации. Кластеры были сделаны минимальными по размерам с тем, чтобы можно было более точно выбрать сечение в образце для последующего анализа. На рис. 6 представлена картина распределения реальных событий АЭ (*б*) и кластеризованных с радиусом 2 мм (*a*). Цифрами показаны координаты кластеров, где проводились вырезки.

Количество пор и их размеры растут с увеличением объема накапливаемой пластической деформации (*a-d*). Количество АЭ событий в каждом сечении показано на рис. 6, *a*, *e* – структура материала в предразрушающем состоянии.

Для сопоставления данных микроскопии и АЭ необходимо было определить пластические деформации, имеющие место в местах вырезок. Деформации определялись экспериментально по отклонениям диаметров образца в местах сечений от исходного. Таким образом были получены поперечные пластические деформации. Продольная составляющая их определялась в предположении, что коэффициент Пуассона в области пластических деформаций с достаточной для практических расчетов точностью может быть принят равным 0,5. Таким образом продольные пластические деформации определялись простым ум-

ножением поперечных на 2 [39]. Продольные пластические деформации вдоль образца, полученные экспериментальным путем представлены на рис. 5, *б*). Треугольниками показаны данные эксперимента, сплошная кривая построена по эмпирической формуле $\varepsilon_x^* = \exp(-0,05^2 x^2)$.

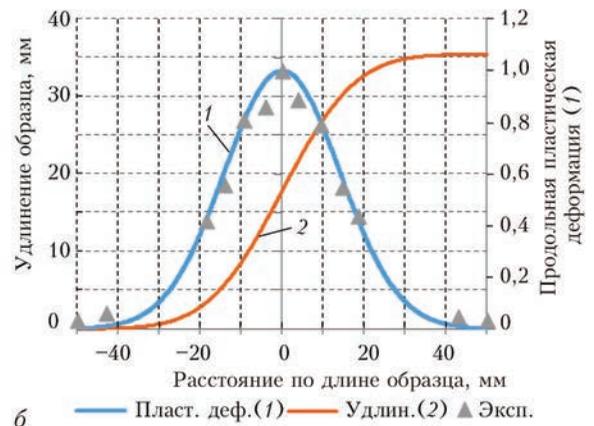


Рис. 5. Фотография образца с порами, вышедшими на его поверхность (*a*); Распределение продольной пластической деформации по длине образца из стали X18H9 и его удлинение (*б*).

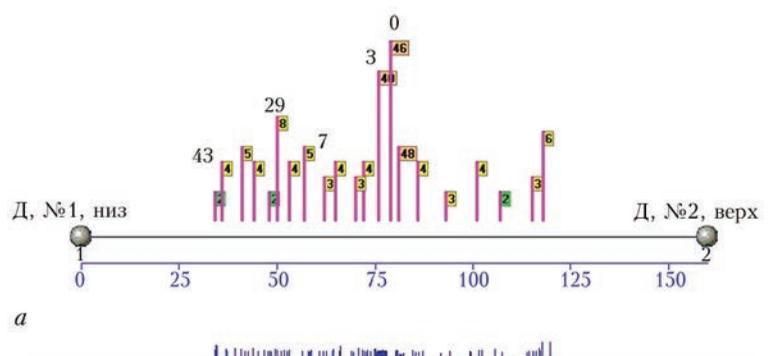


Рис. 6 Координаты кластеров АЭ событий под которыми проводились разрезы для анализа структуры материала образца из стали X18H9 методами металлографии (показаны цифрами над каждым столбиком-кластером, цифры на флажках показывают число событий в кластере) (*a*), амплитуды некластеризованных АЭ событий, (*б, в*) разрушенный образец, (*г*) исходный образец с ослабленной частью протяженностью $\pm 31,5$ мм по обе стороны от центра

Величина общего остаточного удлинения образца получена путем интегрирования кривой на рис. 5, б вдоль оси x в пределах ± 50 мм и составила $\Delta l = 35,5$ мм. Простое измерение удлиненно-го образца показало $\Delta l = 37$ мм.

Фрактограммы на рис. 4 показывают, что разрушение произошло в результате уменьшения активной площади поперечного сечения образца за счет образовавшихся многочисленных пор. Фрактограммы разрушенной поверхности всех испытанных образцов типичны и насыщены большим количеством пор (рис. 4, а–г). Оптическая микроскопия (рис. 7)

подтверждает механизм разрушения данного материала путем образования и накопления пор.

Формирование повреждений, и, в частности пор, как показывают графики рис. 3, происходит задолго до момента разрушения. На рис. 7 представлены микроструктуры материала стали X18H9 при разных величинах пластической деформации, имеющей место в вырезанных для исследований сечениях. Видно, что постепенно структура материала претерпевает изменения, появляются в структуре сначала небольшие поры, затем количество пор растет вместе с ростом их объема, что подтверждается данными АЭ изме-

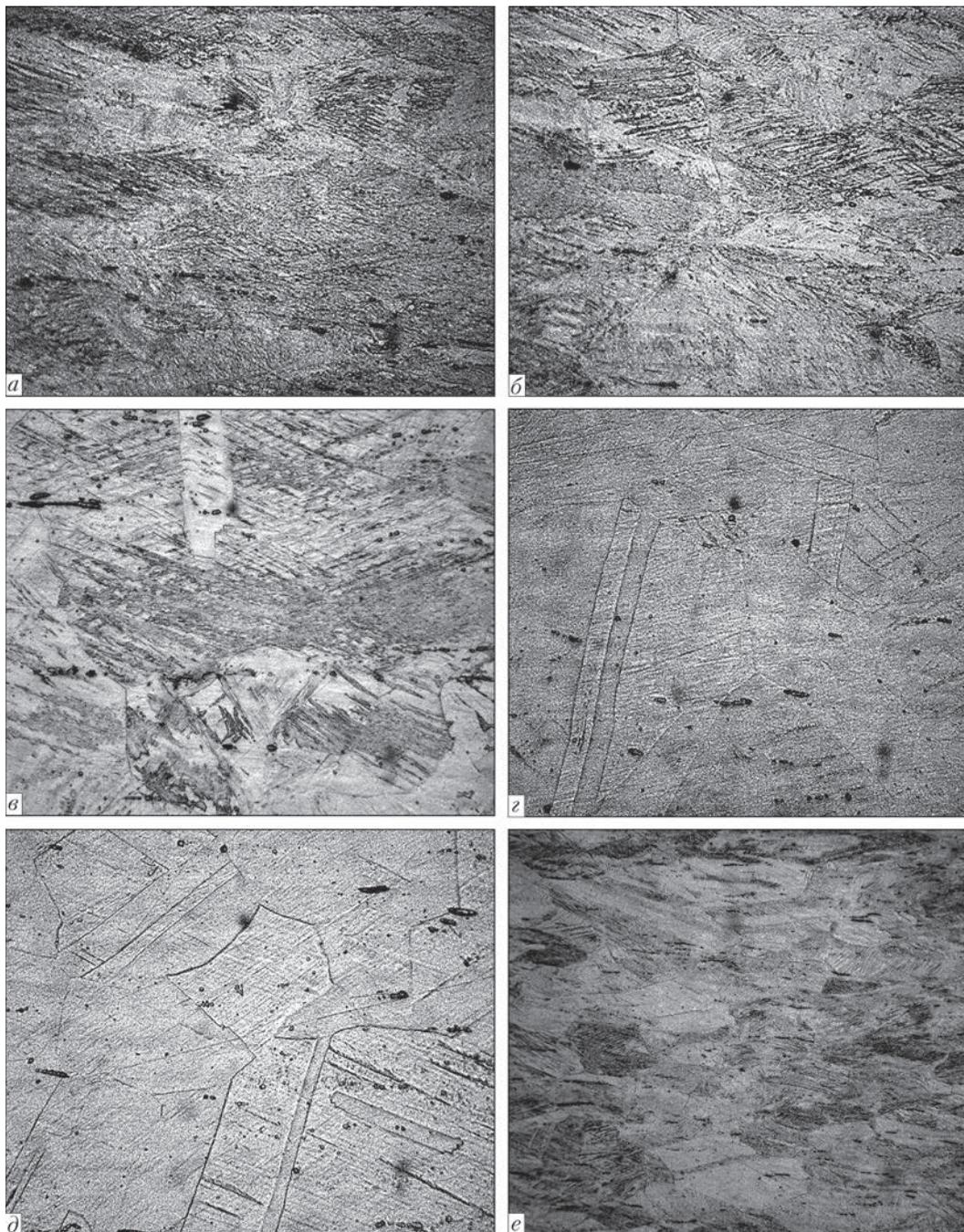


Рис. 7. Изменение структуры ($\times 500$) стали X18H9 на расстоянии x (мм) от места разрушения до анализируемого сечения под действием пластических деформаций: а – 98 % ($x = 3$); б – 87 ($x = 7$); в – 11,9 ($x = 29$); г – 2 ($x = 43$); д – 1,7 ($x = 50$); е – при увеличении 156 в более широком поле видны многочисленные поры в структуре ($x = 3$).

рений. С дальнейшим увеличением деформации поры сливаются и происходит разрушение (рис. 4, 7). Кинетика накопления повреждений также хорошо иллюстрируют графики рис. 3. Таким образом, разработанная методика и аппаратура позволяют достаточно наглядно судить о процессах разрушения, происходящих в материале при его нагружении, оценивать характеристики этого процесса.

На рис. 8 показаны повреждения в структуре стали 12Х1МФ при увеличении 500. Показана также более тонкая, изменяющаяся с увеличением пластических деформаций картина полей дислокаций (увеличение 14000). Видно, что с увеличением объема пластических деформаций потоки дислокаций перестраиваются, происходит их движение с подготовкой к образованию и образованием микротрещин, превращающихся далее в поры. Как видим, даже незначительные деформации приводят к появлению многочисленных микротрещин и, в первую очередь, в менее прочных зернах феррита. С ростом пластических деформаций наблюдается все более выраженное сосредоточение дислокаций в отдельных микрообъемах материала и увеличение их количества. Структура материала постепенно накапливает повреждения вплоть до образования сначала микро, а затем и макропор. Сосредоточение дислокаций неравномерно. Это, по всей вероятности, связано с наличием напряжений третьего рода, уравновешенных в области группы кристаллов. При этом, достаточ-

но небольших внешних усилий, чтобы местные напряжения превзошли предел текучести материала и началось перемещение дислокаций даже на начальных стадиях деформирования.

Достаточно сложная картина распределения АЭ событий фиксируется в более сложных по геометрии конструкциях, когда источников разрушения становится значительно больше, чем в простых случаях. Так, на рис. 1, *а* представлена АЭ информация, поступающая с образца сложной конфигурации. Здесь появился поток АЭ событий с резьбовой части образца. Резьба является концентратором напряжений и вызывает достаточно большой по сравнению с гладкой частью поток событий, характеризующих процессы разрушения в этой части образца. Для наглядности на рис. 3, *б* выделена более узкая область контроля (ослабленная часть конструкции образца). Здесь АЭ информации значительно меньше. И поскольку интерес представляет именно эта часть образца (резьба относится к средству крепления образца в захватах разрывной машины), то простое выделение данной зоны контроля позволяет провести более качественный анализ.

Представленные на рис. 7 исследования структуры металла были проведены в местах образца сечения, показанных на рис. 6, *а*. Исследования микроструктуры выполнялись при увеличении 500. Шлифы для исследований изготавливались по методике Института электросварки им. Е. О.

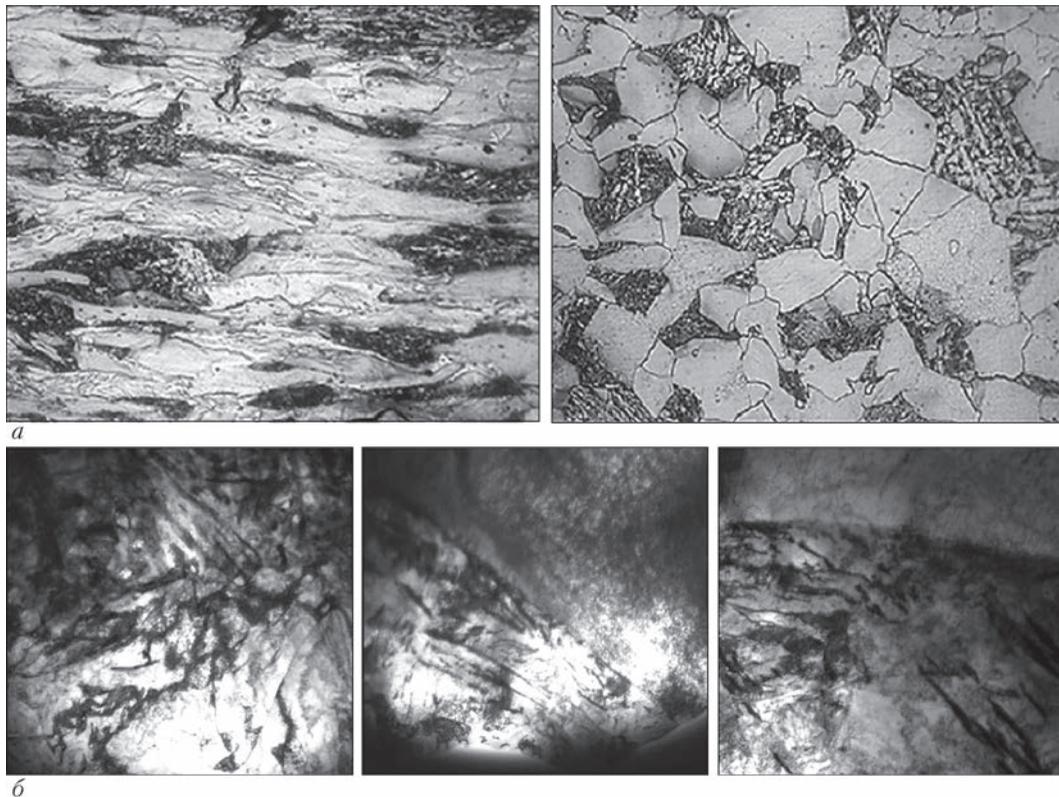


Рис. 8. Изменение микроструктуры стали 12Х1МФ (*а*) и картины полей дислокаций в зависимости от величины пластической деформации (*б*) (увеличение 500 и 14000, соответственно)

Патона НАН Украины. Все это фиксирует и наглядно представляет АЭ (рис. 3, а, б).

Рассмотрим с применением разработанной технологии более подробно кинетику развития разрушений образца сосредоточенных в области с координатой 79 ± 4 мм (место, где постепенно образовалась шейка и произошло разрушение). На рис. 9 приведена картина развития процесса разрушения при растяжении образца. Анализируя графики рис. 9, можно сделать вывод, что повреждения на рассматриваемом участке образца начинают появляться с началом нагружения. В диапазоне 85...100 с количество дефектов возрастает (зеленые столбики). Упрочнение материала и препятствие образованию дефектов происходит неравномерно (бордовые точки на графике). Дальнейшее увеличение деформации приводит к образованию незначительного количества дефектов. В диапазоне времени 212...230 с резко увеличивается количество дефектов. Энергия, затраченная на образование дефектов, представляющая собой сумму затрат энергии на образование отдельных повреждений, растет (розовая кривая на графике). Координаты мест возникновения дефектов в интересующей нас области сосредотачиваются в пределах, заданных границами контроля (79 ± 4 мм). Последующий медленный рост нагрузки (красная кривая) показывает, что в материале протекает пластическое течение. Из графика видно, что новых дефектов после 255 с немного, происходит медленное увеличение их размеров, что подтверждается незначительными импульсными изменениями нагрузки в этой области. В момент времени, равный 353 с, появляется последнее АЭ

событие, фиксирующее образование последнего нового дефекта. Далее металл входит в критическую область деформирования и происходит разрушение образца. В конечном счете, как показали испытания, к разрушению образца привели повреждения, образовавшиеся в процессе его деформирования, и развившиеся в металле поры. Всего в образце АЭ зарегистрировала 3993 повреждения структуры. Из них 315 накапливались в области шейки (рис. 3, б и рис. 9, пятые позиции в таблице значений с правой стороны). Последнее достаточно наглядно подтверждается фрактограммами поверхности разрушения, приведенными на рис. 4. Следует отметить, что на графиках рис. 9 в районе шейки достаточно наглядно выделяются по времени две области возникновения дефектов – в начале нагружения примерно от 20 по 100 с и с 212 по 230 с. Это указывает на неравномерный и отличающийся по своим характеристикам процесс развития разрушения в материалах. В то же время можно видеть, что между этими двумя периодами существуют области, где АЭ не фиксирует развитие дефектов. Выше было сказано, что АЭ фиксирует лишь динамическую составляющую развивающегося события. Анализируя кривую нагрузки (красная кривая) можно наблюдать незначительные, сигнализирующие о возникновении и росте относительно вязких не столь быстро образующихся повреждений. По указанным выше причинам они не были зарегистрированы АЭ.

Таким образом, применение технологии АЭ и чувствительных приборов для регистрации дополнительных низкочастотных параметров, например нагрузки, температуры и других, необходимых для

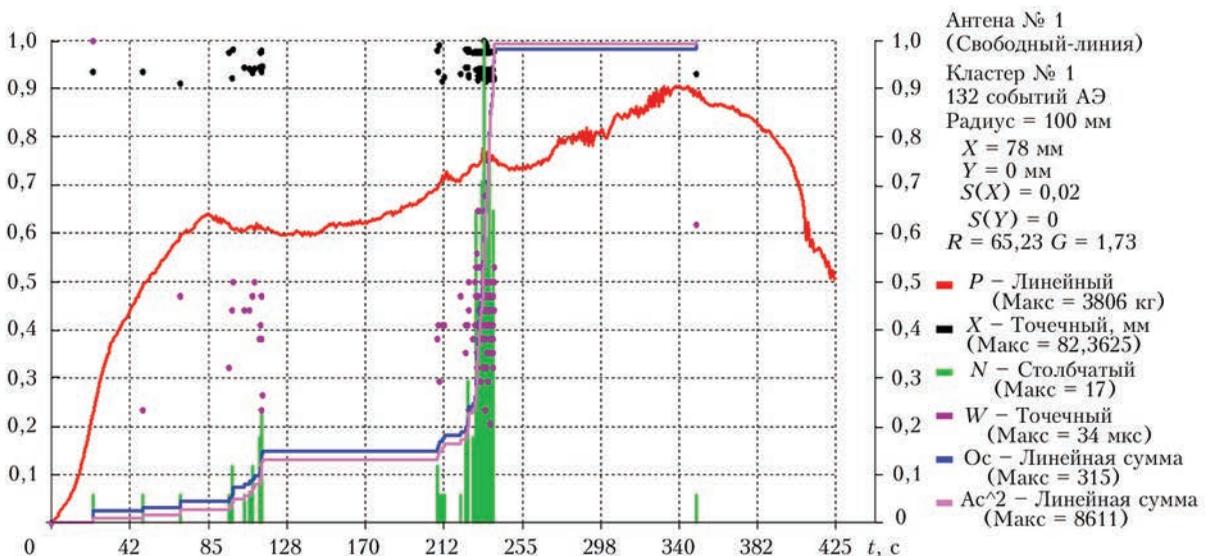


Рис. 9. Распределение событий АЭ в области разрушения образца из стали X18H9 с координатой 79 ± 4 мм (черные точки). Видно, что накопление повреждений в материале образца происходит при различном сопротивлении материала их образованию (точки сиреневого цвета). Показана энергия, затраченная на образование зарегистрированных АЭ повреждений, возникших в процессе разрушения образца (розовая кривая). Синяя кривая показывает кинетику суммирования повреждений в материале образца от начала растяжения. Красная кривая – нагрузка

принятия решения параметров, и соответствующего анализа получаемых данных достаточно полно и наглядно описывает состояние материалов в процессе развития разрушения. Нужно еще раз отметить, что указанные параметры, фиксирующие эти процессы, должны входить в состав ВСМ.

Необходимо также иметь в виду, что распространение методики АЭ на работающие конструкции иногда приводит к необходимости устанавливать АЭ датчики в местах, где в силу тех или иных причин невозможно выполнить требования нормативных материалов по контролю. Особенно часто это относится к конструкциям, работающим при высоких температурах, где наличие изоляции и других средств защиты от теплового воздействия не дает возможности применить стандартные методики контроля. В этих случаях получить необходимую и достаточную для анализа информацию бывает трудно [40]. Тогда для повышения достоверности принятых решений приходится привлекать дополнительные методы контроля, включая измерение и анализ повреждений, накопленных за время эксплуатации конструкции.

Выводы

1. Рассмотрена использующая явление акустической эмиссии методика оценки накопления повреждений, возникающих в материалах при их разрушении. Методика опирается на ситуативную комбинацию составляющих вектора состояния материала (ВСМ). Показана также возможность приближенного нормированного АЭ анализа характера самого процесса разрушения.

2. Испытания показали высокую чувствительность метода АЭ к накоплению повреждений на всех стадиях деформирования. Информация о накоплении повреждений поступает в контролируемую аппаратуру практически непрерывно в процессе проведения испытаний.

3. Для решения поставленной задачи – оценки накопления повреждений на основе данных АЭ, проведено расширение ВСМ за счет введения новых прямых и построенных алгоритмом программы низкочастотных и АЭ параметров, позволивших провести исследование состояния материала, указанное в п. 1.

4. Показано, что состав ВСМ и его достаточность существенно влияют на конечный результат оценки состояния материала конструкций.

5. Выполнена оценка разработанной методики физическими методами исследований изменения структуры аустенитной стали X18H9 и ранее [17, 18] ферритно-перлитной стали 12X1MФ в процессе разрушения. Оценка показала удовлетворительные результаты.

6. Полученные результаты дают возможность по данным АЭ создать исходную картину порооб-

разования в материалах при их разрушении и построить на ее основе компьютерную модель, описывающую этот процесс. Последнее повышает точность и надежность существующей методики прогнозирования разрушения материалов.

Список литературы

- Balderston H. L. (1971) The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 297–317.
- Stone D. E., Dingwall P. F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, **10**, 51–56.
- Gillis P. P. (1971) *Dislocation motions and acoustic emission. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 20–29.
- Nakamura Yosio, Veach C. L., McCauley B. O. (1971) *Amplitude distribution of acoustic emission signals. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 164–186.
- Nishinoiri S., Enoki M., Tomita K. (2002) Evaluation of Microfracture Mode in Ceramic Coating during Thermal Cycle Test using Laser AE Technique. *Materials Transactions*, **45-1**, 92–101.
- Tetelman A. S., Chow R. (1971) *Acoustic emission testing and micro cracking processes. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 30–40.
- Андрейкив А. Е., Лысак Р. В. (1989) *Метод АЭ в исследовании процессов разрушения*. Киев, Наукова думка.
- Березина Т. Г. (1985) Исследование закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей. *Пробл. прочности*, **8**, 48–52.
- Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. (1991) *Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок*. Киев, Эхника.
- Бриджмен Н. (1955) *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. Москва, Изд-во иностр. лит.
- Векслер Е. Я., Заплотинский И. А., Замекула И. В. Толстов В. Ю. (2007) Техническое диагностирование трубной системы подогревателей высокого давления блоков мощностью 100...300 МВт в процессе длительной эксплуатации. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 17–20.
- Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. (1988) *Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов*. Киев, АН УССР, препринт.
- Минц И. И., Березина Т. Г., Ходыкина Л. Е. (1974) Исследование тонкой структуры и процесса образования пор в стали 12X1MФ при ползучести. *Физика металлов и металловедение*, **37**, **4**, 823–876.
- Назарчук З. Т., Скальський В. Р. (2009) *Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Науково-технічний посібник. Т. 1, 2, 3*. Київ, Наукова думка.
- Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Патон Б. Е. (ред.). Киев, Индпром.
- Недосека А. Я., Недосека С. А. (2014) Некоторые особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 3–11.
- Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарєва О. С. (2017) О накоплении повреждений в материалах. *Там же*, **3**, 3–13.
- Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарєва О. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Там же*, **4**, 9–13.
- Недосека С. А. (1992) Метод акустической эмиссии как эффективное средство для исследования кинетики разрушения материалов на стадиях зарождения и развития трещин (Обзор). *Там же*, **3**, 26–34.

20. Недосека С. А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Там же*, **2**, 3–9.

21. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9. *Там же*, **3**, 16–22.

22. Скальский В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Там же*, **4**, 29–36.

23. Скальський В. Р., Мокрий О. М. (2018) Оценка поврежденности ферритно-перлитной стали по величине изменения скорости продольной акустической волны. *Там же*, **1**, 3–7.

24. Стрижало В. О., Стасюк С. З. (2015) Експертна оцінка технічного стану технологічних трубопроводів с водневмістним середовищем. *Там же*, **4**, 7–13.

25. Стасюк С. З. (2018) Контроль технического состояния технологических трубопроводов при длительной эксплуатации в водородосодержащей рабочей среде. *Там же*, **1**, 8–20.

26. *Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ 20911-89.*

27. Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Лебедев А. А. (1993) Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии. *Проблемы прочности*, **12**, 14–21.

28. Черепанов Г. П. (1990) Квантовая механика разрушения. *Там же*, **2**, С. 3–9.

29. (2015) 68-я ежегодная ассамблея международного института сварки IIW-2015. Хельсинки. Финляндия. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 58.

30. Васильев О. С., Грузд А. А., Йолкін А. О. та ін. (2012) 10-річний досвід впровадження безперервного акустико-емісійного моніторингу сховищ аміаку Одеського припортового заводу. *Хімічна промисловість України*, **3**, 43–52.

31. Hartbower C. E., Reuter W. G., Morais C. F., Crimmins P. P. (1971) Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 187–221.

32. Paton B. E., Nedoseka A. J. (1999) Diagnostic of designs and safety of an environment. *The Report on International conference «The Human factor and environment» International Institute of Welding, July 19–20 1999 z., Lisbon, Portugal.*

33. Kishi T., Jhtsu M., Yuyama S. (2000) Eds. *Acoustic Emission – Beyond the Millennium*, Elsevier Science Ltd.

34. Бигус Г. А., Стрелков П. Б. (2005) Исследование акустико-эмиссионных сигналов при деформировании и разрушении образцов из стали 22К. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 10–15.

35. Лебедев А. А., Недосека С. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. (2003) Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов. *Там же*, **2**, 3–8.

36. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2005) Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор). *Там же*, **3**, 20–26.

37. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Там же*, **3**, 7–14.

38. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2016) Интеллектуальные технологии в оценке состояния конструкций. АЭ технология и контролирующая аппаратура нового поколения на ее основе. *Там же*, **2**, 3–18.

39. Малинин Н. Н. (1968) *Прикладная теория пластичности и ползучести*. Пономарев С. Д. (ред.). Учебник для студентов втузов. Москва, Машиностроение.

40. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А., Овсиенко М. А. (2018) О применении технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 34–41.

References

1. Balderston H. L. (1971) The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. *A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 297–317.

2. Stone D. E., Dingwall P. F. (1977) Acoustic Emission parameters and their interpretation. *NDT international*, **10**, 51–56.

3. Gillis P. P. (1971) *Dislocation motions and acoustic emission. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 20–29.

4. Nakamura Yosio, Veach C. L., McCauley B. O. (1971) *Amplitude distribution of acoustic emission signals. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 164–186.

5. Nishinoiri S., Enoki M., Tomita K. (2002) Evaluation of Microfracture Mode in Ceramic Coating during Thermal Cycle Test using Laser AE Technique. *Materials Transactions*, **45-1**, 92–101.

6. Tetelman A. S., Chow R. (1971) *Acoustic emission testing and micro cracking processes. A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. Bal Harbour, 7–8 December*, pp. 30–40.

7. Andrejkiv, A.E., Lysak, R.V. (1989) *EA method in investigation of failure processes*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

8. Berezina, T.G. (1985) Investigation of regularities of fracture development at creep of thermally-stable steels. *Problemy Prochnosti*, **8**, 48–52 [in Russian].

9. Berezina, T.G., Bugaj, N.V., Trunin, I.I. (1991) *Diagnostics and prediction of fatigue life of metal of heat power plants*. Kiev, Tekhnika [in Russian].

10. Bridgman, P. (1955) *Investigation of high plastic deformations and rupture*. Moscow, Izd-vo Inostr. Lit. [in Russian].

11. Veksler, E.A., Zaplotinskii, I.A., Zamekula, I.V., Tolstov, V.Yu. (2007) Technical diagnostics of the piping of high-pressure heaters of 100-300 mW blocks during long-term operation. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 17–20 [in Russian].

12. Lebedev, A.A., Chaurov, N.G. (1988) *Express method for evaluation of crack resistance of ductile materials*. Kiev, NASU [in Russian].

13. Mints, I.I., Berezina, T.G., Khodykina, L.E. (1974) Examination of fine structure and process of pore formation in 12Kh1MF steel at creep. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **37(4)**, 823–876 [in Russian].

14. Nazarchuk, Z.T., Skalskii, V.R. (2009) *Acoustic emission diagnostics of structural elements*. In: *Sci.-Techn. refer. book. Vol. 1, 2, 3*. Kiev, Naukova Dumka [in Ukrainian].

15. Nedoseka, A.Ya. (2008) *Principles of design and diagnostics of welded structures*. Ed. by B.E. Paton. Kiev, Indprom [in Russian].

16. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A. (2014) Features of application of acoustic emission method at destructive testing of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3-11 [in Russian].

17. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I., Kushnareva, O.S. (2017) Accumulation of damages in materials during fracture. *Ibid.*, **3**, 3–13 [in Russian].

18. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Markashova, L.I., Kushnareva, O.S. (2016) On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Ibid.*, **4**, 9-13 [in Russian].

19. Nedoseka, S.A. (1992) Method of acoustic emission as an effective means of material fracture kinetics at the stages of crack initiation and propagation (Review). *Ibid.*, **3**, 26–34 [in Russian].

20. Nedoseka, S.A. (2007) Forecasting the fracture by the data of acoustic emission. *Ibid.*, **2**, 3-9 [in Russian].

21. Nedoseka, A.Ya. (2013) Software of AE diagnostic systems ЕМА-3.9. *Ibid.*, **3**, 16–22 [in Russian].

22. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solids, based on acoustic emission signals. *Ibid.*, **4**, 29–36 [in Ukrainian].
23. Skalskii, V.R., Mokrii, O.M. (2018) Evaluation of damage level in ferritic-pearlitic steels by the value of the change of longitudinal acoustic wave velocity. *Ibid.*, **1**, 3–7 [in Russian].
24. Strizhalo, V.O., Stasjuk, S.Z. (2015) Expert evaluation of technical condition of process piping with hydrogen-containing media. *Ibid.*, **4**, 7–13 [in Ukrainian].
25. Stasyuk, S.Z. (2018) Monitoring the technical condition of process piping at long-term operation in hydrogen-containing working medium. *Ibid.*, **1**, 8–20 [in Russian].
26. *Technical diagnostics. Terms and definitions. GOST 20911-89* [in Russian].
27. Chausov, N.G., Nedoseka, S.A., Lebedev, A.A. (1993) Acoustic emission investigation of the kinetics of steel fracture at final stages of deformation. *Problemy Prochnosti*, **12**, 14–21 [in Russian].
28. Cherepanov, G.P. (1990) Quantum fracture mechanics. *Ibid.*, **2**, 3–9 [in Russian].
29. 68th Annual Assembly of the International Institute of welding – IIW 2015. *Ibid.*, **4**, 58 [in Russian].
30. Vasiliev, O.S., Gruzd, A.A., Yolkin, A.O. et al. (2012) 10 years of experience of introduction of continuous acoustic emission monitoring in ammonia storages at Odessa port plant. *Khimichna Promyslovisht Ukraina*, **3**, 43–52 [in Ukrainian].
31. Hartbower, C. E., Reuter, W. G., Morais, C. F., Crimmins, P. P. (1971) Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking. In: *Proc. of Symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials (Bal Harbour, 7–8 December)*, 187–221.
32. Paton, B. E., Nedoseka, A. J. (1999) Diagnostics of designs and safety of an environment. In: *Report on Int. Conf. on The Human Factor and Environment, IIW (July 19–20 1999, Lisbon, Portugal)*.
33. Kishi, T., Jhtsu, M., Yuyama, S. (2000) Eds. *Acoustic Emission – Beyond the Millennium*, Elsevier Science Ltd.
34. Bigus, G.A., Strelkov, P.B. (2005) Investigation of acousto-emission signals in deformation and fracture of samples of steel 22K. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 10–15 [in Russian].
35. Lebedev, A.A., Nedoseka, S.A., Muzyka, N.R., Volchek, N.L. (2003) Evaluation of the condition of pipe metal after long-term operation in the main gas pipeline system. *Ibid.*, **2**, 3–8 [in Russian].
36. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2005) Diagnostic systems of EMA family. Main principles and architectural features (Review), *Ibid.*, **3**, 20–26 [in Russian].
37. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. *Ibid.*, **3**, 7–14 [in Russian].
38. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2016) Smart technologies for evaluation of structure state (AE technologies and new generation control equipment on its basis). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–18 [in Russian].
39. Malinin, N.N. (1968) *Applied theory of plasticity and creep*. In: *Manual for students of higher education institutes*. Ed. by S.D. Ponomarev. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
40. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A., Ovsienko, M.A. (2018) Application of the technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production. *Ibid.*, **1**, 34–41 [in Russian].

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Л. И. МАРКАШОВА,
Т. О. АЛЕКСЕЕНКО

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ КІНЕТИКИ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ РУЙНУВАННІ МАТЕРІАЛІВ

Інтенсивне застосування акустичної емісії в оцінці стану експлуатації конструкцій призводить до необхідності подальшого розвитку методів, що базуються на застосуванні цього явища, стосовно розрахунків міцності контролюваного матеріалу. Деякі методики в цьому напрямку вже створені, освоєні і успішно використовуються при тривалому моніторинговому контролі. Однак особливості умов експлуатації конструкцій, їх різноманітність за формами і матеріалами, а також зростання вимог до точності і надійності оцінок призводять до необхідності продовження досліджень в даному напрямку. Особливо істотним це стає в даний час, коли велике значення почали набувати системи безперервного моніторингу технічного стану конструкцій. Бібліогр. 40, рис. 9.

Ключові слова: акустична емісія, пластична деформація, методика оцінки накопичення ушкоджень, розрахунок міцності, моніторинг, руйнування

INVESTIGATION BY ACOUSTIC EMISSION METHOD OF THE KINETICS OF DAMAGE ACCUMULATION AT FRACTURE OF MATERIALS

A. Ya. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA, L. I. MARKASHOVA,
T. A. ALEXEENKO

E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU,
11 Kazimir Malevich str., Kiev-150, 03680,
E-mail: office@paton.kiev.ua

Intensive application of acoustic emission at evaluation of the condition of structures in service necessitates further development of the methods, based on this phenomenon, for the case of calculation of the strength of the material being controlled. Some procedures in this area have already been developed, mastered and are used with success in long-term monitoring. However, the peculiarities of structure service, their diversity as to shapes and materials, as well as increase of requirements to accuracy and reliability of evaluations, necessitate continuation of studies in this area. It becomes particularly significant now, when systems of continuous monitoring of the technical state of constructions started acquiring great importance. 40 Ref., 9 Fig.

Keywords: acoustic emission, plastic deformation, procedure of evaluation of damage accumulation, strength calculation, monitoring, fracture

Поступила в редакцію
25.05.2018

Подписку на журнал

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (подписной индекс 74475)

можно оформить через редакцию журнала с любого месяца и на любой срок,

включая выпуски журналов прошлых лет.

Тел./факс: (38044) 200-82-77