

УДК 534.2:539.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В СТАЛИ 45 ПРИ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

© Н.В. Камышанченко, И.Н. Кузьменко, М.Н. Роганин

Kamyshanchenko N.V., Kuzmenko I.N., Roganin M.N. The study of acoustic emission in Steel 45 under constant deformation rate. The article looks at the experiment undertaken by its contributors and discusses the results obtained by them.

### ВВЕДЕНИЕ

Акустическая эмиссия – это явление, возникающее вследствие освобождения энергии в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел, подвергнутых пластической деформации или излому.

Явление АЭ применяется как в исследовательских целях – для изучения динамики развития структуры материала в процессе термомеханического воздействия, так и в целях неразрушающего контроля (НК) – для диагностики состояния потенциально опасных конструкций. Применение АЭ в науке и технике базируется на представлении, что процессы деформации и разрушения служат источниками эмиссии, сигналы которой могут давать детальную информацию об этих процессах.

Огромный темп развития компьютерных технологий отмечен ростом возможностей в области сбора и обработки информации. Широкое применение ресурсов ЭВМ позволяет всесторонне исследовать процесс АЭ, делает исследования более точными и значительно упрощает процедуру их проведения.

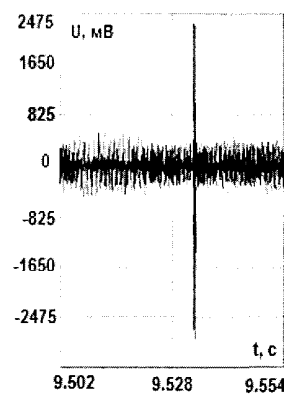
Целью данной работы являлось установление корреляционных связей между параметрами акустической эмиссии (АЭ) и деформационной кривой для образцов из среднеуглеродистой стали 45, и связи динамики процессов пластической деформации с особенностями процесса АЭ на той или другой ее стадии.

### 1. ОБРАЗЦЫ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

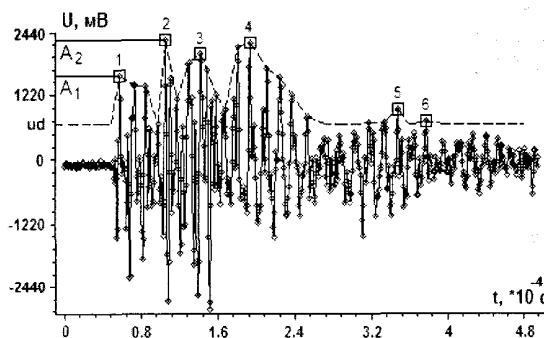
Для исследования были выбраны образцы из стали 45, как одной из наиболее распространенных конструкционных сталей. Образцы выполнены в виде «лопатки» с размером рабочей части 1,5×1,5×25 мм. Деформация образца производилась с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата деформационной машины 2,0...10<sup>-2</sup> мм/с, при комнатной температуре.

Датчик акустической эмиссии крепился на неподвижном захвате, который выступал в роли волновода. Акустический контакт обеспечивался посредством специальной акустической смазки.

Регистрация и обработка экспериментальных данных велась на ЭВМ со встроенным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), позволяющим снимать показания с частотой до 3·10<sup>6</sup> с<sup>-1</sup>.



а)



б)

Рис. 1. а – осциллограмма сигнала АЭ; б – точки, соединенные линией – осциллограмма; пунктирная линия и выделенные точки – результат обработки экспериментальной кривой в Maple ( $ud = 680$  мВ – уровень дискриминации)

В качестве информативных параметров АЭ были взяты:

1) интенсивность АЭ ( $\dot{N} = \Delta N / \Delta t$ , где  $\Delta N$  число импульсов, регистрируемых за время  $\Delta t$ );

2) средняя амплитуда импульсов  $\bar{A}$  за время  $\Delta t$

$$\left( \bar{A} = \frac{1}{\Delta N} \sum_{i=1}^{\Delta N} A_i \right);$$

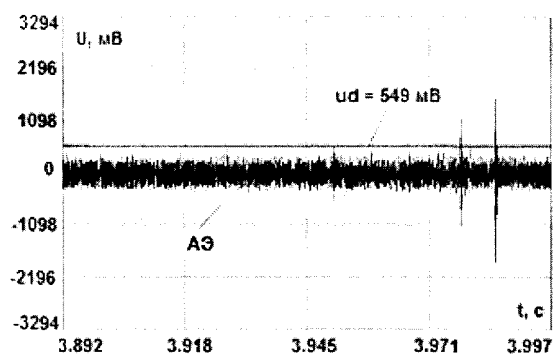


Рис. 2. Осциллограмма АЭ на стадии упругой деформации (ud – уровень дискриминации)

3) амплитудный состав сигнала АЭ ( $\dot{N}(A, t)$ ) от уровня дискриминации до максимально допустимого уровня на входе АЦП разбивался по трем равным амплитудным окнам.

Для расчета указанных параметров была разработана специальная программа в математическом пакете Maple. Наглядный пример работы такой программы представлен на рис. 1. На рис. 1б показан участок осциллограммы, развернутый по времени, соответствующий пику на рис. 1а. Точки на рис. 1б – значения сигнала АЭ, зафиксированные АЦП, которые компьютером последовательно соединены прямыми линиями (осциллограмма). Цифрами 1, 2, ..., n обозначены отдельные импульсы АЭ, выбранные программой из осциллограммы для дальнейшей обработки, а  $A_1, A_2, \dots, A_n$  обозначены их амплитуды.

Об уровне акустического шума работающей деформационной машины можно судить по рис. 2, на котором приведена осциллограмма сигнала, измеренного на стадии упругой деформации. Уровень дискриминации при обработке данных выбирался в  $1,5 \div 2$  раза больше уровня шума установки (прямая линия ud на рис. 2).

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведены зависимости интенсивности АЭ  $\dot{N} = \Delta N / \Delta t$  ( $\Delta t = 2,4$  с) и напряжения образца  $\sigma$  от времени нагружения  $t$ .

На полученной зависимости интенсивности  $\dot{N}(t)$  вдоль деформационной кривой проявляются два максимума и незначительные по величине отдельные всплески АЭ (рис. 3). Первый максимум (I) приходится на начальную стадию упругой деформации, второй максимум (II) лежит в районе предела текучести.

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности АЭ  $\dot{N}$  и средней амплитуды сигнала  $\bar{A}$  (гистограмма) от времени  $t$ . Сопоставляя эти зависимости, видим, что наибольшая амплитуда сигнала приходится на II-й максимум интенсивности АЭ (рис. 4).

На рис. 5 представлены результаты амплитудного анализа  $\dot{N}(A, t)$ , где  $A$  включает в себя амплитудные окна для средних и больших амплитуд сигнала. Из рис. 5 следует, что все импульсы АЭ средней и большой амплитуды регистрируются в районе предела текучести.

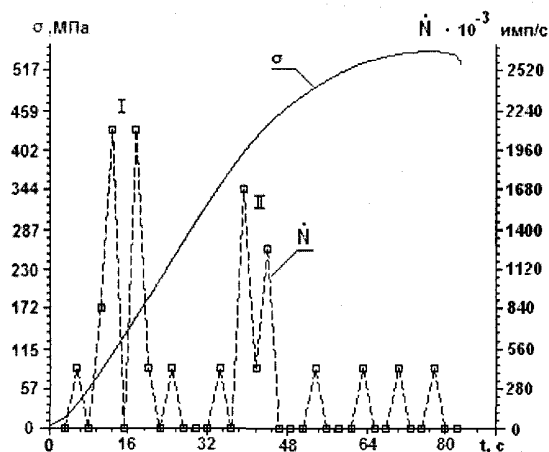


Рис. 3. Зависимости интенсивности АЭ  $\dot{N}$  и напряжения  $\sigma$  от времени  $t$  для образцов Ст45. Интервал времени между двумя соседними значениями интенсивности АЭ  $\Delta t = 2,4$  с

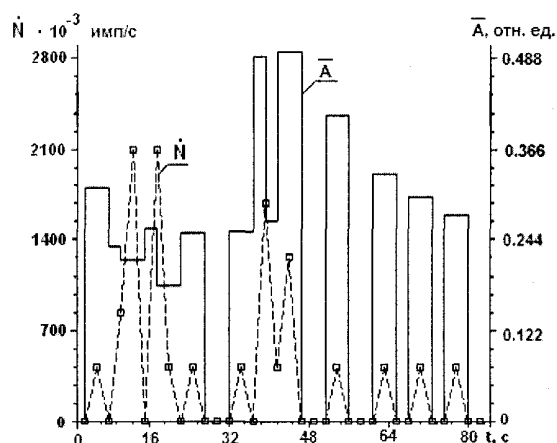


Рис. 4. Зависимость средней амплитуды импульсов  $\bar{A}$  (представлена гистограммой) и интенсивности АЭ  $\dot{N}$  от времени  $t$  для образцов Ст45. Интервал времени между двумя соседними значениями интенсивности АЭ и средней амплитуды импульсов  $\Delta t = 2,4$  с

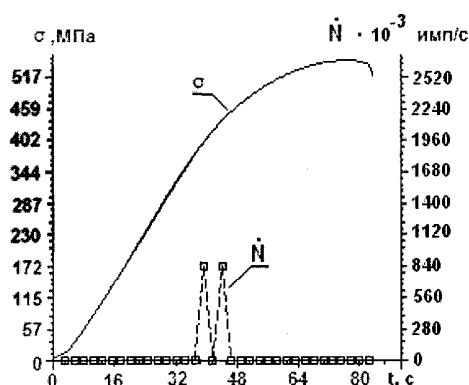


Рис. 5. Результаты амплитудного анализа  $\dot{N}(A, t)$  интегрально по амплитудным окнам для средних и больших амплитуд, зависимость напряжения  $\sigma$  от времени  $t$  для образцов Ст45. Интервал времени между двумя соседними значениями интенсивности  $\Delta t = 2,4$  с

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнения были использованы результаты исследования поведения АЭ в Ст3 и  $\alpha$  – Fe. На рис. 6а приведена зависимость интенсивности АЭ  $\dot{N}$  от величины деформации  $\epsilon$  для образцов Ст3 в районе площадки текучести. Интенсивная АЭ начинается в районе предела текучести, ее уровень сохраняется высоким на протяжении всей площадки текучести. За площадкой текучести в области деформационного упрочнения уровень  $\dot{N}$  сильно снижается. Аналогичная ситуация наблюдалась при испытаниях образцов  $\alpha$  – Fe (рис. 6б) [1].

Эта особенность отражает экспериментально установленный факт движения фронта полосы скольжения [2, 3]. Отсутствие АЭ до верхнего предела текучести в Ст3, а также падение напряжения в районе зуба текучести, сопровождающееся всплеском  $\dot{N}$ , подтверждают предположение о связи верхнего предела текучести с внезапной генерацией большого числа дислокаций и их освобождением путем отрыва от примесных облаков Коттрелла.

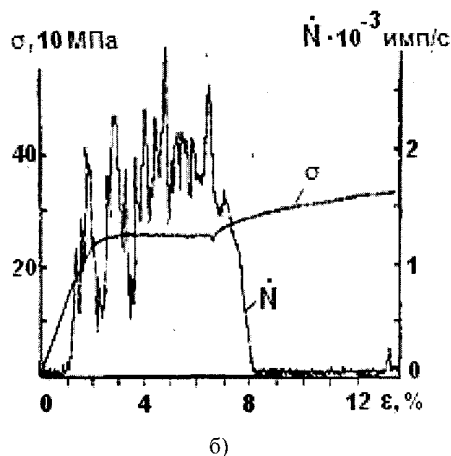
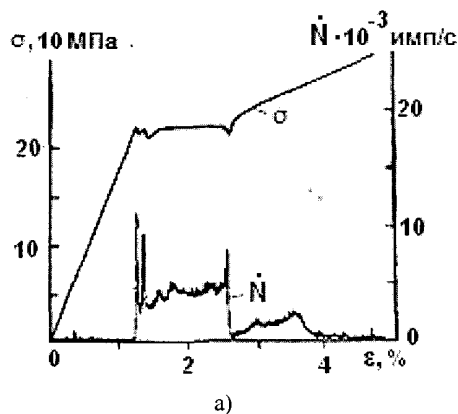


Рис. 6. Зависимости напряжения  $\sigma$  и интенсивности  $\dot{N}$  от степени деформации  $\epsilon$  для образцов Ст3 (а) и  $\alpha$  – Fe (б)

В образцах, выполненных из среднеуглеродистой Ст45 и подвергнутых процессу старения, площадка текучести на деформационной кривой  $\sigma(t)$  не проявляется из-за сдерживающего влияния прослоек карбида на зерна феррита. Однако очень тонкие прослойки не могут оказать сдерживающего влияния, поэтому в отдельных зернах феррита пластические деформации начинаются весьма рано, значительно раньше, чем напряжения достигают предела пропорциональности [4, 5]. Именно с разрушением отдельных прослоек карбида и локальной деформацией матрицы в местах большой концентрации напряжений связан первый максимум  $\dot{N}$  АЭ (рис. 3). Следует отметить, что само по себе растрескивание карбидных включений, в процессе деформации стальных образцов, не является причиной регистрируемой АЭ. К такому выводу пришли авторы работы [6] в силу отсутствия корреляции между АЭ и процессом растрескивания карбида.

При достижении предела пропорциональности число зерен, перешедших в пластическое состояние, значительно увеличивается. Поэтому второй максимум  $\dot{N}$  АЭ (рис. 3) вероятнее всего связан с отрывом дислокаций от примесных атмосфер или работой источников дислокаций. Регистрация в области предела текучести подавляющего числа импульсов АЭ средней и высокой амплитуды (рис. 5) объясняется увеличением деформируемой части рабочего объема образца и, как следствие этого, наложением большого числа импульсов [7].

За пределом текучести, на стадии деформационного упрочнения, уровень интенсивности  $\dot{N}$  АЭ снижается, и здесь наблюдаются незначительные по величине отдельные ее всплески. Это связано с тем, что дислокации, достигая границ зерен, накапливаются у них, создавая при этом большие концентрации напряжений, что в свою очередь способствует разрушению образца. Отдельные же всплески АЭ вызваны либо отрывом скоплений дислокаций от точек закрепления в виде дисперсных выделений в матрице, либо процессом трещинообразования [4, 7].

### ВЫВОДЫ

Как следует из рис. 3, кривые  $\dot{N}$  и  $\sigma$  хорошо коррелируют между собой, т. е. особенности процесса АЭ отражают особенности пластической деформации. В то же время характер зависимости  $\sigma(t)$ , а следовательно, зависимости  $\dot{N}(t)$  для Ст45 и Ст3, имеет значительные отличия (рис. 3, 6). Так, в Ст3 на площадке текучести наблюдается высокий уровень АЭ, который резко снижается при наступлении деформационного упрочнения, в Ст45 после предела текучести фиксируются незначительные по величине отдельные всплески АЭ на всем участке деформационного упрочнения вплоть до разрушения образца. Эта особенность в поведении  $\sigma$  и  $\dot{N}$  объясняется тем, что в Ст45 пластическая деформация определяется деформацией карбидных прослоек между зёрнами феррита вплоть до разрушения образца. Таким образом, процесс акустической эмиссии является чувствительным к особенностям деформации, зави-

сящим от структуры материала, что делает незаменимым метод АЭ при изучении механизмов пластической деформации в углеродистых слабо и средне насыщенными сталях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fisher R.M., Lally L.S. Microplasticity detected by an acoustic technique // *Canad. J. Phys.* 1967. V. 45. № 2. P. 1147-1159.
2. Смирнов Б.Н. К вопросу о площадке текучести железа после деформационного старения // *ФММ.* 1960. Т. 10. № 5. С. 763-766.
3. Давыденко А.А. Некоторые проблемы механики материалов. Л.: Лениздат, 1943. 120 с.
4. Паришин А.М., Неклюдов И.М., Гуляев Б.Б., Камышанченко Н.В., Пряхин Е.И. Структура и свойства сплавов. М.: Металлургия, 1993. 317 с.
5. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1979. 495 с.
6. Swindlehurst W.E. On carbide cracking as a source of acoustic on steel // *J. Mater. Sci.* 1978. V. 13. № 1. P. 209-212.
7. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 108 с.

Поступила в редакцию 13 апреля 2005 г.