

05.1;08

## **Локализованное пластическое течение и пространственно-временное распределение сигналов акустической эмиссии**

© *Е.С. Никитин, Б.С. Семухин, Л.Б. Зуев*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
E-mail: lbz@ispms.tsc.ru*Поступило в Редакцию 28 ноября 2007 г.*

В экспериментах, проведенных на образцах из малоуглеродистой стали, деформирующейся развитием полосы Чернова–Людерса с последующим параболическим деформационным упрочнением, установлена взаимосвязь между макроскопической локализацией пластического течения и пространственно-временным распределением сигналов акустической эмиссии. Показано, что при движении фронта полосы с постоянной скоростью акустическая эмиссия различается на разных этапах движения такого очага локализации. Возникающие на стадии параболического деформационного упрочнения неподвижные очаги локализованного течения оказываются пространственно связанными с неоднородностью деформации при движении полосы Чернова–Людерса.

PACS: 43.35.+d, 43.40.Le, 43.35.Fj, 62.80.+f

Причины, закономерности и особенности локализации пластической деформации изучаются в течение длительного периода времени. Сейчас ясно, что процесс пластического течения имеет волновой характер и протекает неоднородно на всех своих стадиях [1,2]. Экспериментальные исследования локализации пластического течения [3], проведенные в последние годы, установили разнообразие форм реализации этого явления, связь наблюдаемых картин локализации с действующими на соответствующих стадиях процесса законами деформационного упрочнения. Была также подтверждена важная роль локализации в развитии пластического формоизменения.

С другой стороны, известно [4], что процесс пластической деформации сопровождается излучением упругих волн звуковой и ультразвуковой частоты — акустической эмиссией. Сопоставляя эти два класса

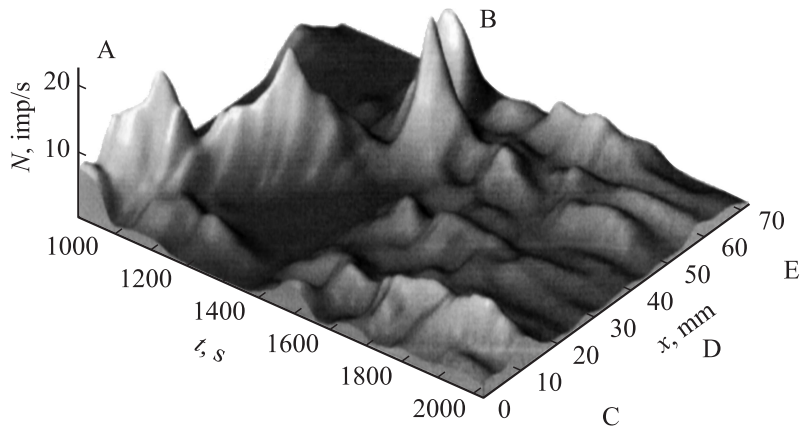
явлений, характерных для развития пластичности, можно полагать, что между локализацией пластического течения, с одной стороны, и координатами источников акустической эмиссии, с другой, должна существовать связь, установлению которой посвящена настоящая работа.

Схема эксперимента была следующей. Акустическая эмиссия при растяжении исследовалась в образцах из малоуглеродистой стали 09Г2С (менее 0.1 wt.% C). Деформационные кривые  $\sigma$ – $\varepsilon$  ( $\sigma$  — деформирующее напряжение,  $\varepsilon$  — деформация) записывались на испытательной машине „Instron-1185“. Эти кривые демонстрируют при растяжении „зуб“ и площадку текучести ( $\sigma = \text{const}$ ), после которой начинается стадия параболического деформационного упрочнения ( $\sigma \sim \sqrt{\varepsilon}$ ). В экспериментах, проведенных ранее [3], показано, что в подобных материалах пластическая деформация протекает локализованно, причем на площадке текучести ее локализация связана с распространением полосы Чернова—Людерса [5,6], а на стадии параболического упрочнения в образце формируется система неподвижных очагов локализации пластического течения, расстояние между которыми составляет  $\sim 10$  mm [1–3].

Сигналы акустической эмиссии при деформации регистрировались пьезодатчиками с полосой пропускания 0.5–2 МГц и после предварительного усиления подавались на электронный осциллограф прецизионного аналого-цифрового преобразователя ЛА-н20-12РС1 с двумя синхронными каналами. Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществлялась синхронно с записью кривой  $\sigma$ – $\varepsilon$ . Файлы с полученными данными сохранялись ПЭВМ.

Анализ полученных данных осуществлялся следующим образом. Координаты источников акустической эмиссии определялись по разности времен прихода акустических импульсов к соответствующим пьезопреобразователям. Пара регистрируемых сигналов от двух датчиков записывалась в отдельный файл при помощи АЦП с частотой дискретизации 50 МГц. Использование АЦП с такими параметрами позволило записывать сигналы акустической эмиссии с уровнем, превышающим заранее заданный порог, обусловленный шумами. При этом длина выборки составляла по 131072 отсчета на каждый канал. Для обработки таких видов и объемов информации, а также для построения диаграмм сглаженного распределения источников акустической эмиссии использовался специально разработанный пакет программ.

Главный результат проведенного исследования состоит в том, что удалось обнаружить соответствие между положением источников акустической эмиссии и картинами локализации пластического течения,



Пространственно-временная диаграмма распределения импульса акустической эмиссии при локализованной пластической деформации.

характерными для стадий площадки текучести и параболического деформационного упрочнения. Прежде всего, становится ясно, что картины локализации источников акустической эмиссии на стадиях площадки текучести и параболического деформационного упрочнения принципиально различаются. Это различие иллюстрируется рисунком, построенным в координатах положение вдоль оси образца ( $x$ )–время ( $t$ )–число импульсов акустической эмиссии в единицу времени ( $N$ ) и обобщающим полученные результаты. Из него следует, что на стадии площадки текучести при распространении вдоль рабочей части образца полосы Чернова–Людерса источники акустической эмиссии локализованы в области перемещающегося фронта полосы. Это следует из упорядоченного распределения зафиксированных сигналов акустической эмиссии, соответствующего прохождению полосы Чернова–Людерса.

С течением времени по мере роста деформации эта акустически активная область перемещается вдоль образца по линии А–В с постоянной скоростью. Оказалось возможным оценить скорость перемещения области локализации, которая составила  $V_{aw} = dx/dt \approx 10^{-4}$  м/с, что по порядку величины совпадает с ранее полученными экспериментальными данными о скоростях перемещения полос Чернова–Людерса в разных металлах и сплавах [1,3,7].

В начале стадии параболического упрочнения картина распределения источников акустической эмиссии по длине образца полностью перестраивается, и источники становятся неподвижными. На этом этапе процесса пластического течения акустически активны три неподвижных источника, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Их координаты во времени не меняются и совпадают с положениями неподвижных очагов локализованной деформации, выявляемых методом спекл-фотографии и характерных именно для этой стадии процесса пластического течения [3,7].

Кроме этого, следует обратить внимание на еще некоторые особенности картин пространственно-временного распределения источников акустической эмиссии при деформации образца, которые следуют из рисунка:

— распределение плотности сигналов в пределах полосы Чернова–Людерса периодически меняется. Период таких изменений составляет  $\sim 200$  s (частота процесса колебаний  $f \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Hz). При скорости движения фронта полосы Чернова–Людерса, которая, как сказано выше, составляет  $\sim 10^{-4}$  m/s, эквивалентная длина волны  $\lambda = V_{av}/f \approx 2 \cdot 10^{-2}$  m;

— положения стационарных очагов локализованной пластичности и соответствующие им источники акустической эмиссии на стадии параболического деформационного упрочнения (позиции С, D и E на рисунке) совпадают с координатами максимумов акустического излучения, отмеченных при деформировании на стадии площадки текучести. Иначе говоря, стационарные очаги зарождаются в местах наиболее интенсивной деформации Чернова–Людерса;

— внутри стационарных областей локализованной деформации распределение интенсивности источников акустической эмиссии также является периодическим во времени с несколько меньшим периодом изменения, составляющим в этом случае  $\sim 100$  s;

— зарождение всех неподвижных очагов происходит одновременно в момент окончания движения полосы Чернова–Людерса по всей длине образца.

Таким образом, в настоящей работе удалось показать, что существует однозначное соответствие между картинами локализации пластического течения на разных стадиях процесса деформирования и распределениями источников акустической эмиссии, действующих в ходе этого же процесса. При этом процессы, протекающие на

ранних стадиях деформирования, „запоминаются“ деформированной средой и определяют развитие очагов локализованной пластичности на последующих этапах нагружения.

## Список литературы

- [1] Zuev L.B. // *Ann. Phys.* 2001. V. 10. N 11–12. P. 965–984.
- [2] Zuev L.B. // *Ann. Phys.* 2007. V. 16. N 4. P. 286–310.
- [3] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С. // *УФМ.* 2002. Т. 3. № 3. С. 237–304.
- [4] Gillis P.P., Hamstad M.A. // *Mater. Sci. and Engng.* 1974. V. 14. N 1. P. 103–108.
- [5] Christ B.W., Pichelesimer M.L. // *Acta. Met.* 1974. V. 22. N 4. P. 435–447.
- [6] Sun H.B., Yoshida F., Ohmory M., Ma X. // *Mat. Lett.* 2003. V. 57. N 23. P. 4535–4539.
- [7] Данилов В.И., Баранникова С.А., Зуев Л.Б. // *ЖТФ.* 2003. Т. 73. В. 11. С. 69–75.