

05:08;12

Особенности акустической эмиссии при развитии полосы Чернова—Людерса в образцах из низкоуглеродистой стали

© Т.В. Муравьев, Л.Б. Зуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021 Томск, Россия
e-mail: lbz@ispms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 24 октября 2007 года)

Проведены экспериментальные исследования акустической эмиссии (АЭ) при пластической деформации образцов из низкоуглеродистой стали. Полученные данные о локализации сигналов АЭ по образцу во времени позволяют следить за перемещением полосы деформации Чернова—Людерса. Проанализированы основные информативные параметры акустической эмиссии на различных стадиях пластического течения. Результаты сопоставлены с данными спекл-видеосъемки и подтверждены их соответствием. Обсуждены возможности определения с помощью акустической эмиссии стадийности пластической деформации и характеристик полосы деформации Чернова—Людерса.

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

Введение

Явление акустической эмиссии (АЭ—АЕ) в металлах и сплавах возникает при перестройке деформационных структур на различных масштабных уровнях [1,2]. Причиной АЭ являются создание и эволюция ансамблей дислокаций и связанные с этим акты релаксации напряжений. Упругая энергия, выделяющаяся при релаксации напряжений в деформируемых областях материала, излучается в виде волн АЭ различной частоты и амплитуды, и может регистрироваться диагностической аппаратурой. В свою очередь, сам акустический сигнал, взаимодействуя в напряженно-деформированном материале с имеющимися в нем структурными неоднородностями, способен инициировать процессы изменения структуры материала, причем такое взаимодействие может обуславливать явление самоорганизации дефектов в деформируемой среде [2]. В связи с этим важной задачей является понимание роли АЭ в процессах, происходящих при локализации пластической деформации (ПД).

Настоящая работа посвящена получению характеристик сигналов АЭ при пластическом течении металлических образцов и их анализу на разных стадиях растяжения.

О методике регистрации сигналов АЭ

При ПД в комплексе событий АЭ присутствуют полезные сигналы и шумы разного происхождения (сигналы от трения и захвата, собственные шумы испытательной машины), которые существенно усложняют отбор полезной информации, особенно при высоких уровнях чувствительности аппаратуры к сигналам АЭ. Для дискретных сигналов применяются методы фильтрации, такие как дискриминация источников по местоположению, спектральному составу или частоте [3].

Существуют два основных способа определения местоположения источников АЭ (локализации) — временной и амплитудный. Первый, как показано на рис. 1 основан на регистрации времен прихода сигнала АЭ на разные преобразователи и вычисления разности времен прихода (РВП—ДА). Такой способ позволяет определить координаты источника наиболее точно (погрешность 5% и менее [3]), особенно для объектов средней и малой протяженности. В случае непрерывной эмиссии этот метод не может быть использован для определения координат локализованных источников АЭ. В этом случае более удобен амплитудный метод, основанный на зависимости затухания акустической волны от расстояния между источником АЭ и акустическим преобразователем.

ПД на микроскопическом масштабном уровне является дискретным процессом, кинетика которого на всех стадиях определяется движением элементарных носителей (дислокацией или их ансамблей) [4]. Следовательно, АЭ, сопровождающая процесс пластического течения,

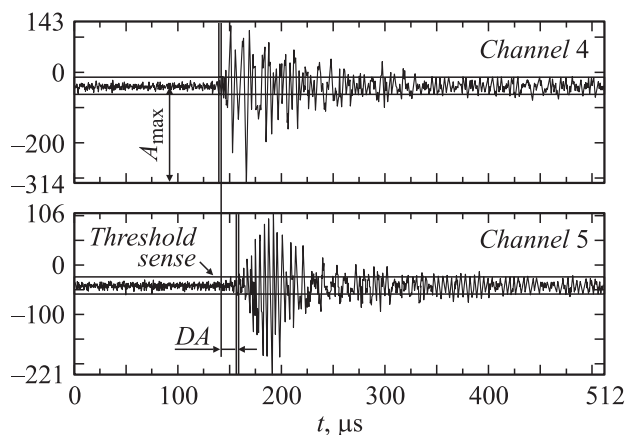


Рис. 1. Регистрация события и определение параметров сигнала.

Основные характеристики комплекса СЦАД 16.02

Количество измерительных каналов	16(2)
Рабочая полоса частот, kHz	100–700
Частота дискретизации, MHz	2
Среднеквадратичная погрешность определения координат дефектов (не более), %	5
Время одного измерения (min–max), ms	0.25–8
Динамический диапазон обрабатываемых сигналов, dB	80
Уровень шума, приведенного ко входу (не более), μV	5
Рабочий диапазон частот ПАЗ, kHz	200–500
Чувствительность ПАЗ в указанном диапазоне частот (не менее), $V/\mu m$	500
Диаграмма направленности ПАЗ	Круговая

также должна иметь дискретный характер. Поэтому в данной работе использовался метод локализации очагов АЭ по РВП. Использован комплекс, состоящий из испытательной машины „Instron-1185“, акустико-эмиссионного комплекса СЦАД 16.02 [3], характеристики которого приведены в таблице, и установки спекл-видеосъемки [5] для визуализации локализации ПД.

Перед испытаниями определялась чувствительность аппаратуры к процессам, происходящим в исследуемых образцах на различных стадиях деформации, а также особенности регистрации АЭ в них. Исследование проведено на образцах из стали 09Г2С ($C — 0.12$; $Mn — 1.4$; $Si — 0.5 \text{ mass\%}$) с удлиненными площадками под захваты испытательной машины. Образцы отжигались в вакууме при $900^\circ C$ в течение 1 h и охлаждались с печью. Преобразователи АЭ устанавливались на недеформируемых площадках у захватов испытательной машины; начальное расстояние между преобразователями составляло 80 mm. Скорость растяжения образца — 1 mm/min. Работа акустико-эмиссионного комплекса, испытательной машины и установки спекл-видеосъемки при проведении эксперимента синхронизировались по времени, причем ошибка в синхронизации данных при построении графиков не превышала 1 s. При испытании таким образом подготовленных образцов на их кривых течения легко выделяются стадии упругой деформации ($\sigma = E\varepsilon$), площадки текучести ($\sigma = \sigma_y' = \text{const}$), на которой деформация локализуется в форме полос Чернова–Людерса (ПЧЛ), и параболического деформационного упрочнения ($\sigma \sim \varepsilon^n$), где $n \leq 1/2$ [6].

Метод локализации источников АЭ, основанный на РВП, позволяет определить положение источника на оси растяжения как $x_i = -\Delta t c / 2$, где Δt — РВП сигналов; c — скорость звука. В диапазоне рабочих частот при толщине исследуемого образца 2 mm в нем наиболее вероятно распространение симметричной и антисимметричной нулевых мод волн Лэмба [7] с групповыми скоростями $C_{OS} = (1.5–1.7)C_t$ и $C_{OA} = (0.8–1)C_t$ соответственно. Здесь $C_t = 3200 \text{ m/s}$ — скорость поперечной

ультразвуковой волны в стали. Поскольку амплитуда изгибной антисимметричной волны Лэмба существенно превышает амплитуду симметричной волны, при расчете координат источника АЭ в качестве информативной использована скорость изгибной волны Лэмба $c = C_{OA} = 2600 \text{ m/s}$.

Для визуализации временных изменений картины локализации зарегистрированный аппаратурой сигнал может быть отображен точкой на линии, соединяющей два преобразователя АЭ. Определив эти точки для всех моментов времени, можно получить координаты сигналов АЭ в ходе испытания образца. Погрешность определения координаты зависит от точности измерения времени прихода сигнала на преобразователь АЭ. Момент прихода дискретного сигнала определяется его передним фронтом. Крутизна таких фронтов может сильно различаться для различных мод сигнала и зависеть от пройденного сигналом пути до преобразователя АЭ. Поэтому распределение точек локализации сигналов всегда имеет определенную для конкретных условий испытаний дисперсию. Для всех сигналов АЭ, полученных в эксперименте, использовалась линейная локализация источников АЭ. Относительное удлинение до разрушения исследованных образцов составляет $\sim 30\%$. Суммарный счет АЭ при каждом испытании достигал $6 \cdot 10^3$ и более сигналов. Из них менее трети локализуется в рабочей зоне образца. Рабочая зона с течением времени удлиняется по закону $l(t) = l_0 + \dot{\varepsilon}t$, как это показано на рис. 2 штриховыми линиями. Это удлинение необходимо учитывать, анализируя картину локализации АЭ.

При исследованиях связи скорости распространения звука [1,8] с деформацией показано, что изменение скорости звука ~ 0.003 заметно уже на упругопластической стадии деформирования, а максимальное изменение этого значения может достигать $\sim 10^{-2}$. Таким изменением скорости в течение эксперимента при расчете координат источников АЭ можно пренебречь. Дополнительную погрешность может вносить неоднозначность установки преобразователей АЭ на контактные площадки. Она легко устраняется внесением поправки, которая будет постоянной для каждого отдельного эксперимента и может смещать начало координат в ту или иную сторону не более чем на 5 mm.

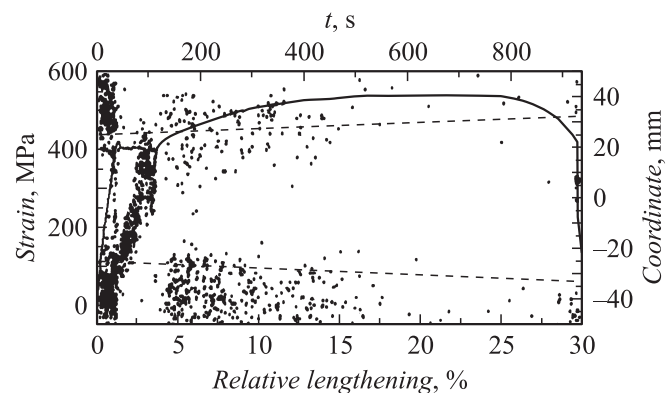


Рис. 2. Кривая пластического течения $\sigma(\varepsilon)$ образца, совмещенная с картиной локализации сигналов АЭ.

Результаты исследования локализации ПД методом АЭ и их обсуждение

Типичное для образцов из использованного материала пространственное распределение импульсов АЭ, совмещенное с кривой $\sigma(\epsilon)$, показано на рис. 2. Расположение источников сигналов явно связано со стадийностью пластического течения, причем эта связь позволяет разделить стадии деформационного упрочнения в процессе испытания образца.

Сигналы, регистрируемые в начале процесса, по-видимому, определяются деформацией при трении захватов испытательной машины о поверхность площадок образца, что подтверждается сосредоточением мест локализации источников АЭ вблизи этих зон.

Далее на кривых $\sigma(\epsilon)$ наблюдается площадка текучести (время от 40 до 115 с), на которой развитие локализованной ПД осуществляется движением ПЧЛ, а характер АЭ заметно меняется. Акустическая эмиссия, зарегистрированная на этом этапе процесса, соответствует движущемуся источнику, положение которого совпадает, как будет показано ниже с ПЧЛ. По наклону прямой, проведенной по точкам графика зависимости положения источников АЭ на стадии площадки текучести от времени, очевидно, можно определить скорость распространения ПЧЛ на этой стадии процесса.

Анализ перехода от площадки текучести к стадии параболического деформационного упрочнения показал, что на этом этапе процесса АЭ прекращается и не фиксируется до того момента, когда напряжение текучести повысится до уровня верхнего предела текучести стали σ_y'' . Эта пауза, названная „зоной молчания“, наблюдалась на всех испытанных образцах и характерна именно для начала стадии параболического упрочнения. Возникновение „зоны молчания“, по всей вероятности, связано с эффектом Кайзера [9] — отсутствием сигналов АЭ до момента превышения напряжения, достигнутого при предыдущем нагружении. Наличие такой особенности АЭ может означать, что на фронте развивающейся ПЧЛ действуют не номинальные напряжения, индикаторно равные нижнему пределу текучести σ_y' , а эффективные напряжения, близкие к верхнему значению этого параметра σ_y'' [10,11], т.е. возникает концентрация напряжений.

На стадии параболического деформационного упрочнения, как можно видеть на рис. 2, источники зарегистрированных сигналов АЭ локализованы в основном на краях рабочей части образца. В его центральной части плотность сигналов АЭ заметно ниже.

Анализ показывает, что рассмотренные стадии процесса течения существенно различаются значениями акустических параметров. Это ясно иллюстрируется рис. 3, где представлена активность АЭ (число импульсов в единицу времени), и рис. 4, демонстрирующим их амплитуду на разных этапах деформирования. На площадке текучести амплитуды имеют меньший разброс значений. Сигналы, сопровождающие область упругой

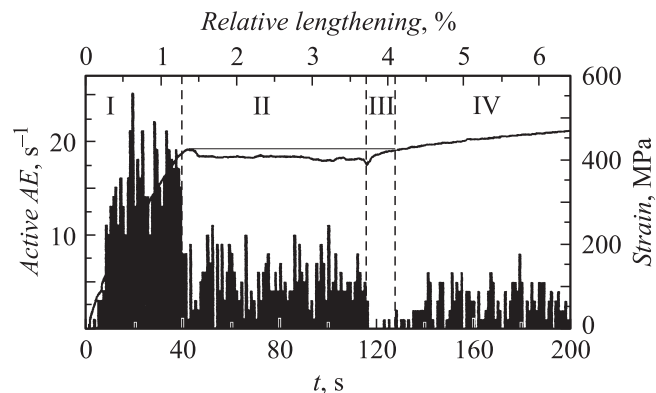


Рис. 3. Активность АЭ при деформировании образца; штриховыми линиями выделены характерные стадии локализации АЭ (I — упругая; II — площадка текучести; III — „зона молчания“; IV — стадия параболического упрочнения).

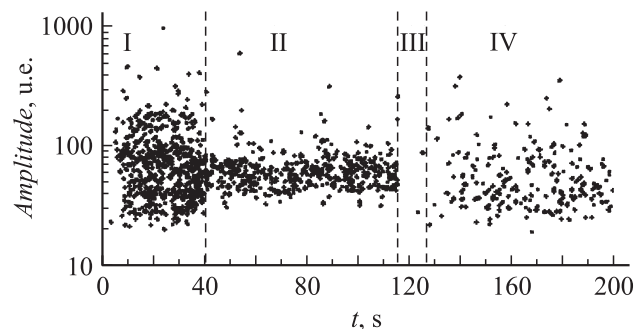


Рис. 4. Амплитуды сигналов АЭ при деформировании образца.

деформации, от начала и до самого ее завершения имеют большую активность и амплитуду. Заметим, что „зона молчания“ хорошо выделяется также по данным рис. 3 и 4.

В том случае, когда ПД на площадке текучести реализуется встречным движением двух ПЧЛ, локализация источников АЭ проявляет те же особенности, как это можно видеть на рис. 5. В этом случае движение первой полосы локализации, сопровождающееся характерным для этой стадии пространственным распределением источников АЭ, началось у неподвижного захвата и продолжалось с постоянной скоростью до тех пор, пока она не сблизилась со второй полосой. Вторая полоса локализации двигалась навстречу первой от противоположного захвата. При их сближении скорость первой ПЧЛ упала почти до нуля. Это падение сопровождалось падением числа импульсов АЭ. Затем полосы образовали широкую область локализации и на 130-й секунде от начала деформирования аннигилировали. Этот процесс связан со специфической картиной локализации АЭ, что хорошо видно на графиках, и заканчивается в тот момент времени, когда происходит переход от площадки текучести к

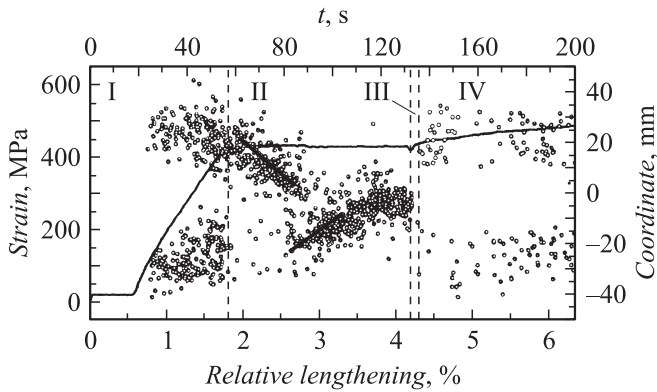


Рис. 5. Схема движения полос локализации деформации на стадии площадки текучести: I — упругая стадия; II — площадка текучести; III — „зона молчания“; IV — стадия параболического упрочнения.

стадии параболического деформационного упрочнения. Кстати, оказалось, что положение полос локализации в момент их аннигиляции определило место образования шейки и точку разрыва образца после окончания деформации. Такая схема развития локализованной ПД характерна для всех образцов исследуемого материала, но взаимное соотношение координат множественной АЭ (полос Чернова—Людерса) во времени — индивидуально.

Поскольку пластическое течение оказывается локализованным с самого начала после достижения предела текучести [1,2], большой интерес представляет попытка установления пространственной связи между локализацией источников АЭ и локализацией пластического течения. На одном из образцов это соответствие было зафиксировано одновременной регистрацией АЭ и спекл-видеосъемкой (рис. 6). На рис. 6, *a* представлена совмещенная диаграмма кривой нагружения и локализации АЭ, а на рис. 6, *b–d* — кадры спекл-видеосъемки нагружаемого образца, выбранные в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 на площадке текучести. Сравнение акустических и видеокартин указывает на их полную временную и пространственную согласованность. Можно проследить за движением двух ПЧЛ навстречу друг другу до момента времени t_2 , когда движение первой полосы приостановилось на 5 с и она перестала излучать, и после возобновления движения первой полосы вплоть до момента аннигиляции.

Движение полос сопровождалось локализацией АЭ из соответствующих зон излучения и отображалось построением точек локализации источников АЭ. Для подтверждения соответствия показаний этих методов была вычислена скорость перемещения ПЧЛ по данным локализации АЭ и спекл-видеосъемки (наклоны соответствующих графиков), которая в обоих случаях составила 0.8 mm/s. Кроме того, ширина зоны излучения АЭ (~ 20 mm) совпадает с шириной видимого изображе-

ния ПЧЛ на спекл-видеоизображениях. Это показывает, что отображение точек локализации АЭ, действительно, соответствует движению ПЧЛ по образцу.

На стадии параболического упрочнения с помощью используемой в работе установки спекл-видеосъемки зафиксировать очаги локализации ПД и их движение не удалось. Локализация АЭ по методу РВП на этой стадии также не позволила пока определенно говорить о причине возникновения источников сигналов в центре рабочей части. Очевидно, для определения процессов структурных преобразований на этой стадии чувствительности используемой аппаратуры недостаточно.

Заключение

На всех образцах получены картины локализации АЭ, на которых можно выделить интервалы времени, соответствующие стадиям ПД на кривой $\sigma - \varepsilon$. Предварительный анализ некоторых основных параметров сигналов АЭ показывает, что между ними и процессами, протекающими при пластической деформации, имеется опре-

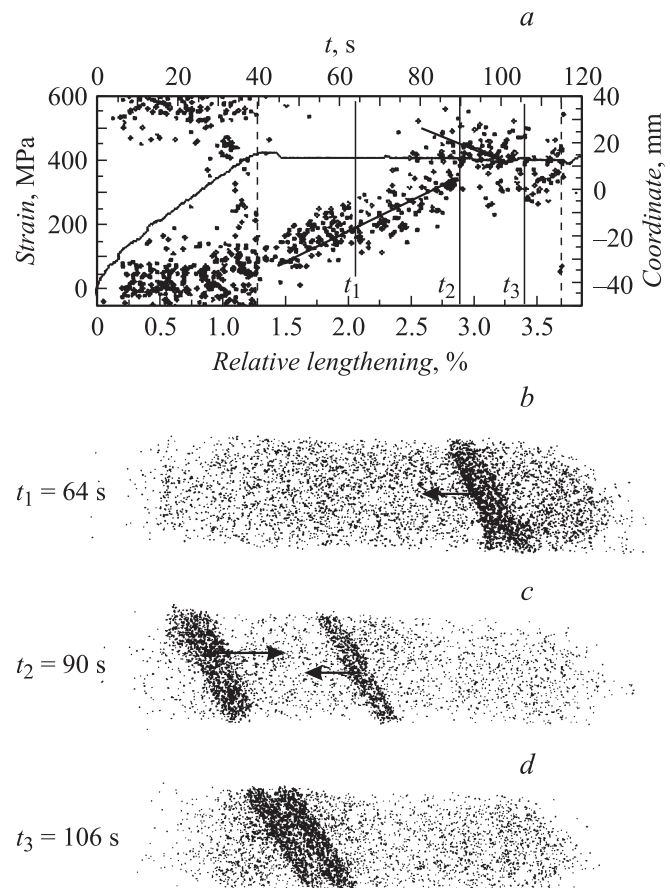


Рис. 6. Картина локализации ПД, полученная методами АЭ и спекл-интерферометрии: *a* — график деформирования образца, совмещенный с локализацией сигналов АЭ по времени (штриховой линией выделен интервал движения полос до момента их аннигиляции); *b–d* — кадры спекл-видеосъемки в моменты времени, указанные на рисунке.

деленная взаимосвязь. В частности, построив картину локализации АЭ и используя дополнительные данные об амплитудах и активности сигналов, можно проследить схему движения полос деформационного упрочнения на стадии площадки текучести, определить их скорость и при необходимости оценить скорость нагружения образца. Кроме того, с некоторой вероятностью можно прогнозировать место образования шейки и разрыва образца, не заканчивая испытание полным разрушением, что может найти практическое применение. Имеющаяся на сегодняшний день аппаратура для регистрации АЭ не приспособлена для подобных исследований, но все же при использовании определенных методов и корректной обработке позволяет исследовать такие тонкие процессы на начальном уровне.

Если кривая течения содержит площадку текучести, то она может быть выделена по изменению активности сигналов АЭ или особенностями графика локализации АЭ. Изменение активности указывает на переходы между стадиями: при переходе от упругой стадии к площадке текучести активность падает в два раза и далее сохраняется на уровне 5–10 sign/s. Падение активности до нуля („зона молчания“) указывает на завершение площадки текучести и предсказывает переход к стадии параболического упрочнения. Указанные переходы отмечаются на графиках распределения амплитуд главным образом, измерением дисперсии характеристик сигналов, которая имеет меньшее значение на площадке текучести и повышенное — на других стадиях. Это показывает, что главным источником сигналов АЭ на данной стадии является ПЧЛ. Более наглядно картину движения фронтов волн деформационного упрочнения демонстрируют графики локализации, также выделяющие площадку текучести и позволяющие определить на этой стадии без дополнительного оборудования скорость движения, ширину ПЧЛ, наличие нескольких фронтов и прогнозируемое место образования шейки и разрыва при дальнейшем деформировании.

- [8] *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.
- [9] *Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М.* Обратимая пластичность кристаллов. М.: Наука, 1991. 280 с.
- [10] *Christ B.W., Picklesimer M.L.* // Acta. Met. 1974. Vol. 22. N 4. P. 435–447.
- [11] *Fujita H., Miyazaki S.* // Acta. Met. 1978. Vol. 26. N 9. P. 1273–1281.

Список литературы

- [1] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С.* // УФМ. 2002. Т. 3. № 3. С. 237–304.
- [2] *Zuev L.B.* // Ann. Phys. 2007. Vol. 16. N 4. P. 286–310.
- [3] *Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В.* Акустико-эмиссионная диагностика конструкций. М.: Радио и связь, 2000. 280 с.
- [4] *Судзуки Т., Ёсинага Х., Такеути С.* Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989. 294 с.
- [5] *Поляков С.Н., Бикбаев С.А., Зуев Л.Б.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 137–139.
- [6] *Sun H.B., Yoshida F., Ohmory M., Ma X.* // Mat. Lett. 2003. Vol. 57. N 23. P. 4535–4539.
- [7] *Викторов И.А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.