

05:08;12

## Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al

© Л.Б. Зуев, Б.С. Семухин, К.И. Бушмелева

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 1 октября 1998 г.)

Исследовано изменение скорости распространения ультразвука при пластической деформации поликристаллического алюминия. Показано, что зависимости скорости ультразвука от деформации и действующего напряжения являются трехстадийными. Сложный характер этих зависимостей позволяет выделить на параболической кривой пластического течения материала дополнительные стадии, не обнаруживаемые традиционными методами. Предложено объяснение полученных закономерностей на базе представлений об изменении дефектной структуры материала при деформации.

### Введение

Общепринятые представления о процессе пластической деформации, как правило, основываются на данных о его стадийности [1], причем адекватность создаваемых моделей предполагает точное соответствие определенных стадий и их микроскопических механизмов. Выяснение границ и тем более природы каждой из стадий в особенности для поликристаллов оказывается сложной задачей, так как часто отсутствуют достаточно информативные и надежные внешние признаки смены механизмов деформации. Во многих случаях полезными для этих целей могут оказаться сведения об интегральных характеристиках материала, таких как намагниченность, электросопротивление и др. Они оказываются тем более ценными, что в отличие от микроскопических исследований могут применяться непосредственно во время механических испытаний и не требуют дополнительных операций по подготовке специальных образцов для анализа.

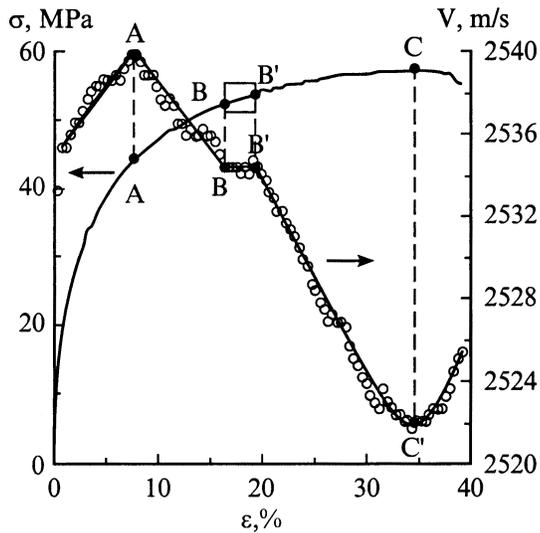
Перспективными с этой точки зрения представляются акустические методики исследования свойств твердых тел. К обычно используемым с этой целью эффектам, таким как акустическая эмиссия, возникающая при нагружении [2], или амплитудная зависимость внутреннего трения [3], для интерпретации которых существуют в достаточной мере развитые теории, может быть добавлена более просто измеряемая характеристика — скорость распространения ультразвука  $V$ . Как показывают, например, данные [4], скорость ультразвука монотонно изменяется в начале пластической деформации растяжения монокристаллов Al. Авторы [5] также наблюдали вариации пропорциональной  $V$  резонансной частоты алюминиевых монокристалльных образцов при их изгибе и связали его с изменением затухания при увеличении плотности дислокаций в ходе пластического течения. Очевидно, что эффект не может быть велик, поскольку  $V \approx (E/\rho_0)^{1/2}$ , но ни модуль упругости  $E$ , ни плотность  $\rho_0$  не меняются существенным образом при пластическом течении [6]. Тем не менее при современном уровне измерительной техники это изменение вполне может быть зафиксировано [7] с достаточной степенью точности.

В настоящей работе получены данные о зависимости  $V$  от величины общей деформации  $\varepsilon$  и действующего напряжения  $\sigma$  в более широком по сравнению с [4,5] диапазоне деформаций вплоть до разрушения. Измерение скорости ультразвука (поперечные волны с частотой 2.5 MHz) проводилось непосредственно при растяжении образцов на испытательной машине "Instron-1185" методом автоциркуляции ультразвуковых импульсов с помощью специально сконструированного прибора [7] с точностью  $\sim 10^{-4}$ . Расстояние между пьезопреобразователями было фиксированным и не менялось при удлинении образца во время растяжения. Образцы имели вид двойной лопатки с рабочей частью длиной 50 mm. Измерения были проведены на поликристаллическом (размер зерна 5...10 mm) Al, кривая течения которого является практически параболической [1,8] на всем своем протяжении. В большинстве случаев исследователи не наблюдают каких-либо отчетливо выраженных стадий течения в этом материале.

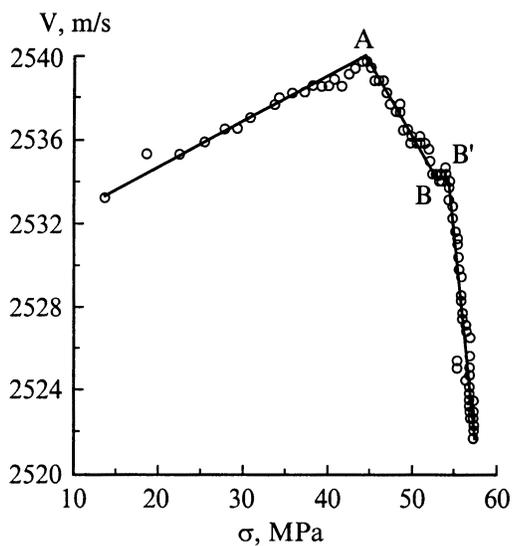
### Экспериментальные результаты

Измерения, проведенные на протяжении всего процесса растяжения с интервалом 0.5%, привели к обнаружению интересных закономерностей, хорошо выявляемых при анализе зависимостей  $V(\varepsilon)$  и  $V(\sigma)$ . Было установлено, что скорость распространения ультразвука существенно меняется при растяжении, а зависимости  $V(\varepsilon)$  и  $V(\sigma)$  достаточно сложны. Так, представленная на рис. 1 кривая  $V(\varepsilon)$  для поликристаллического Al имеет  $N$ -образную трехстадийную форму [9], которая указывает на различие природы связи  $V$  и  $\varepsilon$  в соответствующих интервалах пластической деформации.

Зависимость  $V(\sigma)$ , показанная на рис. 2, для этого же образца Al также имеет три стадии, причем обращает на себя внимание линейный характер связи  $V$  и  $\sigma$  на каждом этапе. Характерные точки приведенных зависимостей, обозначенные на рис. 1 и 2  $A$ ,  $B$ ,  $B'$  и  $C$ , надежно разделяют кривую течения на стадии (рис. 1). Установленный вид зависимостей  $V(\varepsilon)$  и  $V(\sigma)$  указывают на более сложную, чем парабола  $\sigma \sim \varepsilon^{1/2}$ , форму кривой пластического течения. Так, представление выделенного на



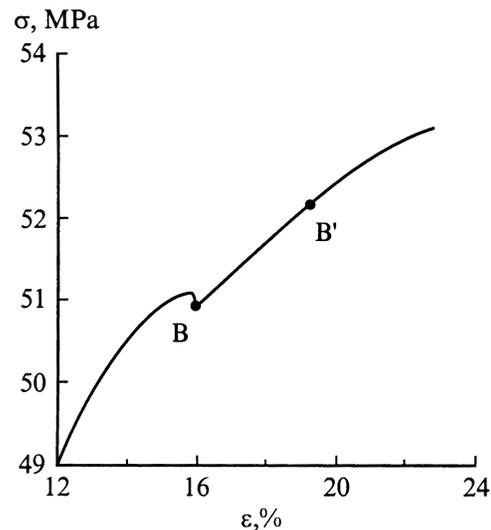
**Рис. 1.** Диаграмма пластического течения поликристалла Al и зависимость скорости распространения ультразвука в нем от деформации.



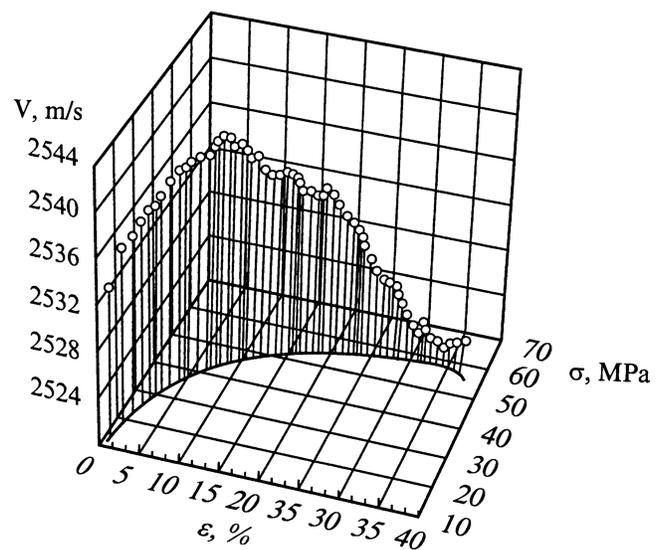
**Рис. 2.** Зависимость скорости распространения ультразвука от действующего напряжения в поликристаллическом Al.

кривой течения участка  $B-B'$  в более крупном масштабе (рис. 3) выделило в этой области линейную стадию, на которой  $\sigma \sim \epsilon$ . Ранее Жауль [8] обнаружил, что при испытаниях при температуре 77 К кривая пластического течения поликристаллического Al состоит из двух параболических участков, разделенных стадией линейного упрочнения. Последняя укорачивается по мере повышения температуры испытания и при 300 К становится практически незаметной. Есть основания полагать, что ультразвуковой метод позволяет зафиксировать именно этот момент перехода между параболическими стадиями, что невозможно сделать, пользуясь только зависимостью коэффициента деформационного упрочнения от деформации.

Рис. 4 обобщает данные о сложном характере изменения  $V$  вдоль всей кривой пластического течения  $\sigma(\epsilon)$ . Спаду деформирующей силы в конце процесса растяжения, связанному, как известно, с образованием макроскопической шейки, соответствует возрастание скорости ультразвука, что хорошо видно также на рис. 1 и 2. Рост скорости распространения ультразвука в этой области деформации начинается еще до появления заметной шейки и указывает на предкритическое состояние деформируемого материала. Это же состояние может быть выявлено по возникновению описанного в [10,11] локализованного максимума компонент тензора пластической дисторсии, также обнаруживаемого задолго до появления шейки и сигнализирующего о зарождении очага вязкого разрушения. Деформации, отвечающие



**Рис. 3.** Участок кривой течения, соответствующий постоянно значению скорости распространения ультразвука.



**Рис. 4.** Изменение скорости распространения ультразвука вдоль кривой пластического течения поликристалла Al.

двум этим признакам, совпадают, так что параллельное использование двух методик повышает достоверность процедуры предсказания разрушения.

## Обсуждение результатов

Из рис. 2 следует, что величины  $V$  и  $\sigma$  связаны линейно

$$V = V_0 + \xi \sigma, \quad (1)$$

но константы  $V_0$  и  $\xi$  различны для разных участков зависимости  $V(\sigma)$ . Поскольку коэффициент  $\xi$ , как следует из приведенных данных, меняет знак в ходе пластического течения, он должен зависеть от какой-либо характеристики материала, способной вести себя аналогично в этом процессе. Набор подобных характеристик в рассматриваемой проблеме пластической деформации ограничен, но известно, например, что плотность подвижных дислокаций  $\rho$  зависит от деформации экстремально (рис. 5, *a*) [12] и, следовательно, ее производная по времени  $t$  (или по деформации, так как при активном нагружении  $\varepsilon \sim t$ ) должна менять знак. В рассматриваемом случае удобно ввести производную —  $d/dt(1/\rho) \equiv D^{(\varepsilon)}$ , имеющую размерность "коэффициента диффузии" ( $m^2/s$ ). Можно показать (рис. 5, *b*), что временной ход величины  $D^{(\varepsilon)}$  вполне соответствует приведенным рассуждениям о знаке коэффициента  $\xi$ . На смысле  $D^{(\varepsilon)}$  следует остановиться особо. Ранее в наших работах [10,11] было показано, что для каждой стадии пластического течения характерна специфическая картина локализованной пластической деформации. Эти картины были интерпретированы как автоволны пластической деформации [10,11], причем в описывающие их реакционно-диффузионные дифференциальные уравнения [13] входит связанный с плотностью подвижных дислокаций коэффициент  $D^{(\varepsilon)}$ , имеющий вышеуказанный смысл и контролирующий процесс распространения пластической деформации. Размерность коэффициента  $\xi$  в (1), очевидно,  $[L]^2 \cdot [T] \cdot [M]^{-1} (m^2 \cdot s \cdot kg)$ . Учитывая дополнительно, что скорость распространения упругих волн в веществе связана с его плотностью  $\rho_0$ , можно с помощью анализа размерностей получить

$$\xi \sim L_i / \rho_0 D^{(\varepsilon)}. \quad (2)$$

Появляющаяся здесь величина  $L_i$  интерпретируется как пространственный масштаб действующего в данный момент внутреннего уровня пластической деформации [14] (характерный размер области неоднородности деформации). Тогда соотношение (2) формально объясняет дискретное изменение коэффициента  $\xi$  переходом процесса на другой масштабный уровень [14], а поведение  $D^{(\varepsilon)}$  определяет смену знака  $\xi$  при пластической деформации. Ясно, что постоянство наклона участков зависимости  $V(\sigma)$  соблюдается только при выполнении условия  $L_i/D^{(\varepsilon)} = \text{const}$ .

Используя предложенную форму (2) для коэффициента пропорциональности  $\xi$  и вводя волновое сопротивление среды  $Z = V\rho_0$  [15], придадим уравнению (1)

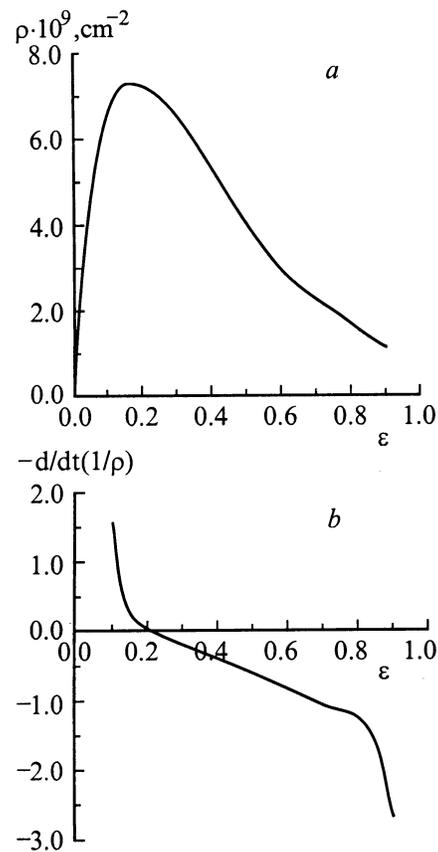


Рис. 5. Плотность подвижных дислокаций [10] и поведение коэффициента  $D^{(\varepsilon)}$  в зависимости от деформации (схема).

следующий вид:

$$\Delta Z = Z - Z_0 = (L_i/D^{(\varepsilon)}) \cdot \sigma, \quad (3)$$

из чего следует, что волновое сопротивление материала меняется при пластической деформации в соответствии с параметрами внутренней структуры материала, возникающей на каждой стадии этого процесса. Это утверждение нашло прямое подтверждение в специальном эксперименте, в котором при малых деформациях одновременно с записью диаграммы деформации не только фиксировалась скорость распространения ультразвука, но и методом рентгеновской топографии были получены данные о движении крупных элементов структуры в отдельных зернах поликристалла Al [16]. Топограммы снимались методом Фудживара [17] во время растяжения поликристаллического образца алюминия (без разгрузки). Результаты измерений скорости ультразвука в таких условиях приведены на рис. 6. Анализ поведения фрагментов зерен по их лауэ-рефлексам показал, что при деформации  $\varepsilon < \varepsilon^*$  разориентировки фрагментов зерен возрастают, а скорость ультразвука быстро растет. После перехода через критическую степень деформации  $\varepsilon^*$  наблюдается обратный разворот фрагментов и темп прироста скорости падает.

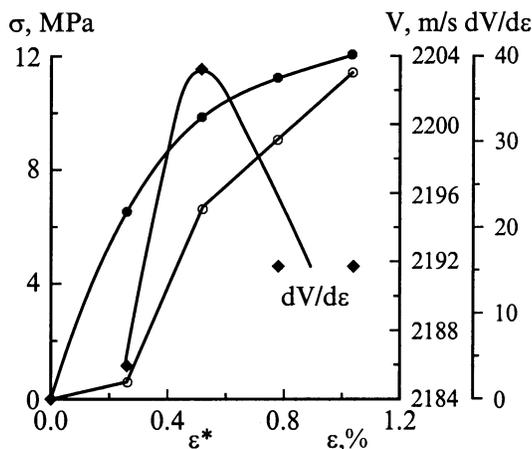


Рис. 6. Изменение скорости ультразвука в области малых деформаций.

Феноменологически изменение скорости распространения ультразвука объясняется наличием в объеме среды мозаики напряженных областей, распределение и размер которых, очевидно, меняется в ходе пластического течения. Проведем оценку возможного изменения скорости распространения ультразвука в этом случае, используя модель, предложенную в [18]. За счет упругих напряжений поперечная ультразвуковая волна расщепляется на два взаимно перпендикулярно поляризованных луча (акустическое двойное лучепреломление), имеющих разные скорости распространения  $v_1$  и  $v_2$ . Разность хода на единицу длины пути составит в этом случае [18]

$$\delta = (\omega/2\pi)(1/v_2 - 1/v_1). \quad (4)$$

С другой стороны, эта разность хода зависит от разности главных напряжений  $\sigma_2$  и  $\sigma_1$  в кристалле [18]

$$\delta = (\omega/4\pi\rho_0v_s^3)(\sigma_2 - \sigma_1), \quad (5)$$

где  $\omega$  — частота ультразвуковых колебаний,  $v_s$  — скорость распространения поперечных ультразвуковых волн в ненапряженном кристалле.

Введя обозначения  $\Delta V = v_2 - v_1$  и  $v_2 \cdot v_1 \approx v_s^2$ , из (4) и (5) получаем изменение скорости ультразвука

$$\Delta V \approx (\sigma_2 - \sigma_1)/2\rho_0v_s \quad (6)$$

или с учетом (3) изменение волнового сопротивления

$$\Delta Z \approx (\sigma_2 - \sigma_1)/2v_s. \quad (7)$$

Таким образом, характер приращения скорости  $\Delta V$ , наблюдаемый в эксперименте, указывает на изменение параметров напряженных областей в деформируемой среде в ходе пластического течения. Такое поведение, очевидно, может быть связано с формированием дислокационных ансамблей или более крупных особенностей деформационной структуры типа (самоорганизованной) упорядоченной системы стационарных мезоскопических очагов локализации пластической деформации [10,11], характерной для пластической деформации Al [19].

## Заключение

Ясно, что анализ изменения скорости распространения ультразвука при деформации растяжения создает возможность выделения дополнительных стадий кривой пластического течения, обусловленных, видимо, различием типов дислокационных ансамблей, создающихся в деформируемом материале (ячейки, фрагменты и т.п. [14]) на разных этапах течения. Можно полагать, что смена стадий зависимости  $V(\sigma)$  связана в этом случае с формированием дислокационных ансамблей различного характерного размера  $L_i$  и разным уровнем внутренних напряжений в объеме ячейки или фрагмента. Именно это отражается на форме зависимости скорости ультразвука от деформации или напряжения. Такие изменения механизма деформации практически не отражаются на характере кривой течения и поведения коэффициента деформационного упрочнения, но их влияние на скорость ультразвука оказывается весьма заметным. *In situ* измерение скорости ультразвука в процессе механических испытаний материалов может давать дополнительную важную информацию о физике деформационных процессов.

Наблюдаемый эффект в достаточной степени универсален. Аналогичные изменения скорости распространения ультразвука при пластической деформации были обнаружены нами также при растяжении образцов из сплава Al–Mg–Li в разных структурных состояниях, сплава Zr + 1.5% Nb и кремнистого железа (Fe + 3% Si). В качестве примера на рис. 7 приведена зависимость  $V(\sigma)$  для последнего, отличающаяся лишь количественно от представленной на рис. 2. Во всех перечисленных случаях кривые пластического течения разделялись на стадии, не выявляемые непосредственно по форме кривой.

Таким образом, измерения скорости распространения ультразвука в материалах при пластической деформации

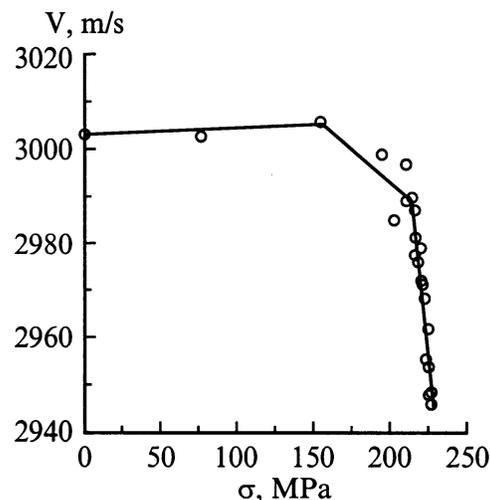


Рис. 7. Зависимость скорости распространения ультразвука от деформации для поликристаллического сплава Fe + 3% Si.

позволяют анализировать стадийность кривых пластического течения непосредственно в ходе эксперимента и прогнозировать, например, переход к стадии вязкого разрушения до появления его видимых признаков.

## Список литературы

- [1] *Зегер А.* // Дислокации и механические свойства кристаллов. Сб. ст. / Под ред. М.В. Классен-Неклюдовой, В.Л. Инденбома. М.: ИЛ, 1960. С. 179–268.
- [2] *Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М.* Обратимая пластичность кристаллов. М.: Наука, 1991.
- [3] *Лебедев А.Б.* // ФТТ. 1993. Т. 35. Вып. 9. С. 2305–2341.
- [4] *Hikata A., Chick V.B., Elbaum C.* // Acta met. 1962. Vol. 10. N 4. P. 423–429.
- [5] *Лебедев А.Б., Кустов С.Б., Кардашев Б.К.* // ФТТ. 1992. Т. 34. Вып. 9. С. 2915–2921.
- [6] *Томас Т.* Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М.: Мир, 1964. 308 с.
- [7] *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л.* Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996.
- [8] *Jaoul V.* // J. Mech. Phys. Solids. 1957. Vol. 5. N 1. P. 95–101.
- [9] *Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелева К.И.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 14. С. 76–79.
- [10] *Zuev L.B., Danilov V.I.* // Int. J. Solids Structures. 1997. Vol. 34. N 29. P. 3795–3805.
- [11] *Зуев Л.Б., Данилов В.И.* // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 8. С. 1399–1403.
- [12] *Гилман Дж.* // Микропластичность / Под ред. В.Н. Геминова, А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1972. С. 18–37.
- [13] *Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г.* Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987.
- [14] *Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И.* и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, 1990.
- [15] *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИЛ, 1956.
- [16] *Зуев Л.Б., Полетика Т.М., Семухин Б.С.* // Кристаллография. 1995. Т. 40. № 6. С. 1071–1073.
- [17] *Гинье А.* Рентгенография кристаллов. М.: ГИФМЛ, 1961.
- [18] *Tokioka T., Iwashimizu Yu.* // Int. J. Solids Structures. 1968. Vol. 4. N 3. P. 383–391.
- [19] *Данилов В.И., Зуев Л.Б., Мних Н.М., Панин В.Е.* // ФММ. 1991. № 3. С. 188–194.