

05;08;12

## Зависимость скорости ультразвука от действующего напряжения при пластическом течении поликристаллов

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

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

(Поступило в Редакцию 19 октября 1998 г.)

Измерены зависимости скорости распространения ультразвука в поликристаллических материалах от величины действующего при деформации напряжения. Установлено, что зависимости имеют три стадии, обусловленные, по-видимому, формированием в деформируемом материале дислокационных ансамблей различного характерного размера.

Общепринятые модели процессов пластической деформации, как правило, включают в себя представления о его стадийности [1]. Но если для монокристаллов, в особенности гранецентрированных кристаллов, выделение стадий кривой течения не представляет труда, то для материалов других кристаллических классов и особенно поликристаллов эта процедура остается сложной, так как отсутствуют достаточно информативные и надежные признаки смены механизмов деформации. Ранее нами [2] было показано, что в ходе процесса пластического течения скорость распространения ультразвука в материале меняется, причем зависимость  $V(\varepsilon)$  имеет сложный  $N$ -образный вид. Это позволило, например, выделить на кривой пластического течения Al дополнительные стадии, связанные [3] с различиями в динамике поворотов блоков при деформации.

В настоящей работе приведены данные о зависимости  $V$  от величины действующего при деформации напряжения  $\sigma$ . Измерение скорости ультразвука (поверхностные волны, частота 2.5 MHz) проводили при растяжении образцов на испытательной машине Instron-1185 прибором ИСП-12 [4], работающим по принципу автоциркуляции импульсов. Образцы имели вид двойной лопатки с рабочей частью длиной 50 mm. Измерения были проведены на Al, сплавах Al + Li с разным содержанием Li, Fe + 3%Si, Zr + 1.5%Nb, а также сталях 65Г и 09Г2С.

Типичные зависимости  $V(\sigma)$ , показанные на рис. 1 для Al и Fe + 3%Si, имеют три стадии, причем обращает на себя внимание линейный характер связи  $V$  и  $\sigma$  на каждом этапе. Для остальных материалов, изученных в ходе описанных экспериментов, получены аналогичные трехстадийные зависимости  $V(\sigma)$ . Важно иметь в виду, что закон пластического течения Al и других исследованных материалов в этом интервале деформаций имеет вид  $\sigma \sim \varepsilon^{1/2}$  и на кривых  $\sigma(\varepsilon)$  не наблюдается каких-либо переломов. Следует отметить, что два ниспадающих участка зависимости  $V(\sigma)$  присутствуют во всех исследованных материалах, а левая ветвь графика может иметь положительный (Al и сплавы на его основе, сплавы Zr + 1.5%Nb, Fe + 3%Si) или нулевой (стали) наклон. Спаду деформирующей силы в конце процесса растяжения, связанному, как известно, с образованием

макроскопической шейки, обычно соответствует некоторое возрастание скорости ультразвука.

Обсуждая природу установленных закономерностей, следует в первую очередь отметить, что ранее [5] сообщалось о монотонном снижении  $V$  при пластической деформации монокристаллов Al вследствие эволюции дислокационной структуры. Авторы [6] также наблюдали изменение пропорциональной  $V$  резонансной частоты алюминиевых монокристалльных образцов при их изгибе и связали его с изменением затухания при увеличении плотности дислокаций в ходе пластического течения. Однако представляется, что использование зависимости  $V(\sigma)$  позволяет более строгим образом выделять стадии на параболической кривой пластического течения  $\sigma \sim \varepsilon^{1/2}$ . Рис. 2 демонстрирует сложный характер изменения  $V$  вдоль кривой  $\sigma(\varepsilon)$ . Уравнение, связывающее величины  $V$  и  $\sigma$ , очевидно, имеет вид

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

причем константы  $V_0$  и  $\xi$  различны для разных участков зависимости  $V(\sigma)$ . Размерность коэффициента пропорциональности  $\xi$  в (1), очевидно,  $[L]^2 \cdot [T] \cdot [M]^{-1}$ . Поскольку этот коэффициент, как следует из приведенных данных, может менять знак в ходе пластического течения, он должен содержать какую-либо микроскопическую характеристику, также способную менять знак в этом процессе. Набор подобных характеристик в рассматриваемой проблеме ограничен. Известно, что плотность подвижных дислокаций  $\rho_{md}$  зависит от деформации экстремально [7] и, следовательно, ее производная по времени (или по деформации, так как при активном нагружении  $\varepsilon \sim t$ ) должна менять знак. Вводя производную  $d/dt(1/\rho_{md}) = D^{(\varepsilon)}$ , имеющую размерность и смысл "коэффициента диффузии" в уравнении автоволны пластической деформации [8,9], и учитывая, что скорость распространения упругих волн в веществе связана с его плотностью  $\rho_0$ , можно с помощью анализа размерностей записать

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

Здесь  $L_i$  — характерный масштаб действующего в данный момент уровня пластической деформации [10]. Появление последней величины позволяет формально объяснить дискретное изменение коэффициента  $\xi$  переходом

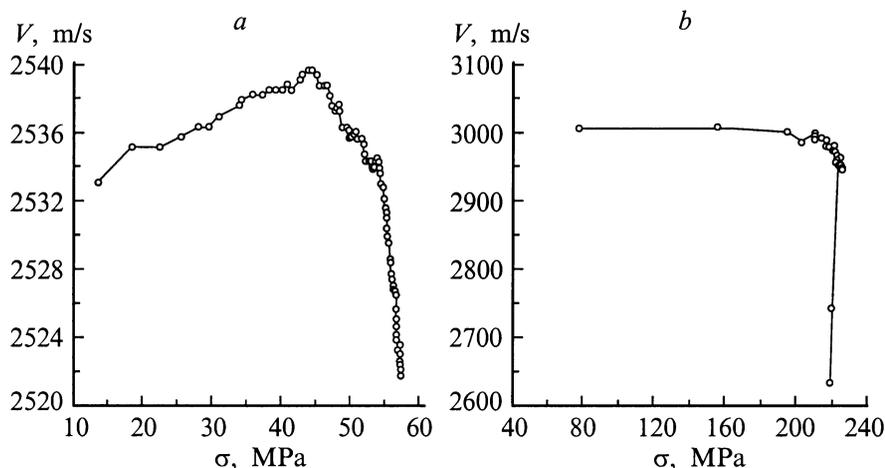


Рис. 1. Зависимость скорости распространения ультразвука от действующего напряжения: *a* — Al; *b* — Fe + 3%Si.

процесса на другой масштабный уровень [10], а поведение  $D(\epsilon)$  определяет вариации знака  $\xi$  при пластической деформации.

С другой стороны, известно [11], что скорость распространения ультразвука "чувствует" внутренние напряжения в среде. Поэтому наблюдаемые при пластической деформации изменения этой величины могут быть связаны с изменением размеров напряженных областей и уровня внутренних напряжений в них. Совершенно ясно, что измерение скорости распространения ультразвука в ходе растяжения дает возможность выделить дополнительные стадии на кривой пластического течения, обусловленные, видимо, различным характером дислокационных ансамблей, создающихся в деформируемом материале (ячейки, фрагменты [12]). Можно полагать, что межстадийный переход на зависимости  $V(\sigma)$  связан в этом случае с формированием дислокационных ансамблей различного характерного размера  $L_i$  и разным уровнем средних внутренних напряжений в объеме ячейки или фрагмента. Именно это отражается на фоне зависимости

скорости ультразвука от деформации или напряжения. Интересно, что такие изменения дислокационной микроструктуры практически не обнаруживаются по поведению коэффициента деформационного упрочнения, но их вклад в изменение скорости ультразвука оказывается весьма заметным. Таким образом, измерение скорости ультразвука непосредственно в процессе механических испытаний материалов может давать дополнительную важную информацию о физике деформационных процессов.

### Список литературы

- [1] Зегер А. // Дислокации и механические свойства кристаллов. Сб. статей / Под ред. М.В. Классен-Неклюдовой, В.Л. Инденбома. М.: ИЛ, 1960. С. 179–268.
- [2] Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелева К.И. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 14. С. 76–79.
- [3] Зуев Л.Б., Полетика Т.М., Семухин Б.С. // Кристаллография. 1995. Т. 40. № 6. С. 1071–1073.
- [4] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 183 с.
- [5] Hikata A., Chick V.B., Elbaum C. // Acta Met. 1962. Vol. 10. N 4. P. 423–429.
- [6] Лебедев А.Б., Кустов С.Б., Кардашев Б.К. // ФТТ. 1992. Т. 34. Вып. 9. С. 2915–2921.
- [7] Гилман Дж.Д. // Микропластичность. Сб. статей / Под ред. В.Н. Геминова, А.Г. Рахшадта. М.: Металлургия, 1972. С. 18–37.
- [8] Zuev L.B., Danilov V.I. // Int. J-1 Solids Structure. 1997. Vol. 34. N 29. P. 3795–3805.
- [9] Зуев Л.Б., Данилов В.И. // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 8. С. 1399–1403.
- [10] Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 1. С. 7–34.
- [11] Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Киев: Наукова думка, 1986. Т. 1. 376 с. Т. 2. 536 с.
- [12] Набарро Ф.Р.Н., Базинский З.С., Холт Д.Б. Пластичность чистых монокристаллов. М.: Металлургия, 1967. 214 с.

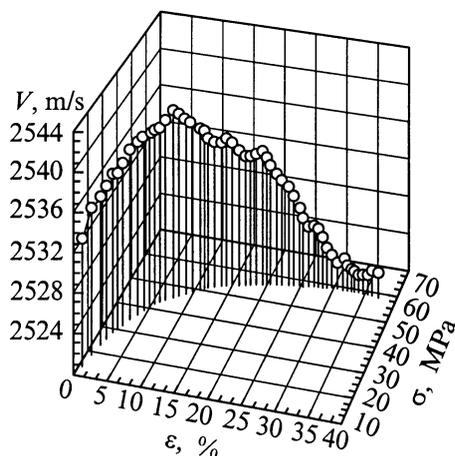


Рис. 2. Изменение скорости распространения ультразвука вдоль кривой пластического течения Al.