

01;05

## Дисперсия волн локализации пластической деформации

© С.А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
E-mail:bsa@ms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 28 июля 2003 г.  
В окончательной редакции 20 октября 2003 г.

Рассмотрены основные закономерности макроскопической локализации пластической деформации в ОЦК сплаве Fe–3%Si на стадии линейного деформационного упрочнения. Установлен волновой характер локализации деформации, определена скорость распространения волн локализации. Получены данные о законе дисперсии волн локализованной пластической деформации для поликристаллов Al и сплавов на основе Fe в моно- и поликристаллическом состояниях.

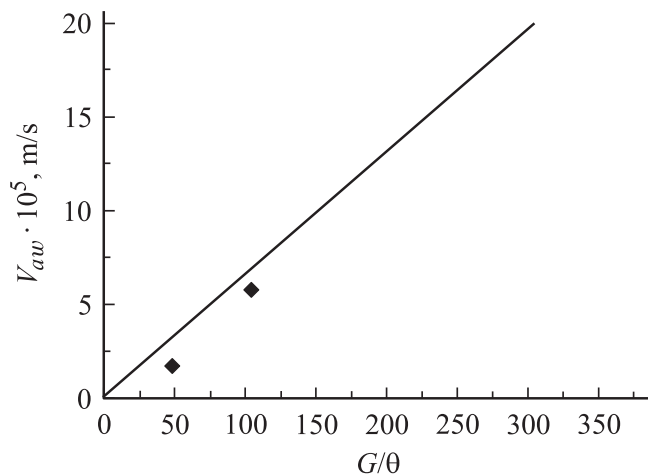
Как установлено ранее [1], локализация пластической деформации металлов и сплавов проявляется на всех стадиях процесса пластического течения. В исследованиях последних лет показано, что на всем протяжении кривой пластического течения  $\sigma(\varepsilon)$  последовательно реализуются различные формы макроскопической неоднородности пластической деформации [2,3]. В экспериментах, проведенных на достаточно широком круге чистых металлов и сплавов в моно- и поликристаллическом состояниях, была установлена однозначная связь особенностей локализации пластической деформации с законом деформационного упрочнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon = \theta(\varepsilon)$ . Каждой стадии пластического течения отвечает вполне определенный тип картины локализации деформации. При этом смена закона деформационного упрочнения сопровождается образованием новой формы локализации деформации. Изложенные выше данные свидетельствуют о том, что в процессе пластического течения в образцах самопроизвольно возникает локализация деформации, форма которой тесно связана с действующим на соответствующей стадии законом пластического течения. Наблюдаемые закономерности самопроизвольно возникают при растяжении с постоянной скоростью, т. е. являются результатом самоорганизации пластического течения [4].

Особенно интересная картина локализации деформации наблюдается на стадии линейного деформационного упрочнения, когда  $\theta = \text{const}$ . В этом случае наблюдаемая пространственно-временная картина неоднородности пластического течения имеет форму бегущей вдоль образца волны с характерной скоростью распространения  $V_{aw}$  и длиной волны  $\lambda$ . Эти величины были ранее измерены в экспериментах, проведенных на монокристаллах  $\gamma$ -Fe [5–7], монокристаллах Cu и Ni [8] и поликристаллах Al [9] и Zr [10]. Обработка полученных данных показала, что скорость распространения волн на стадии линейного упрочнения обратно пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения

$$V_{aw} = \frac{J}{\theta}, \quad (1)$$

где коэффициент  $J = 6.3 \cdot 10^{-7}$  m/s.

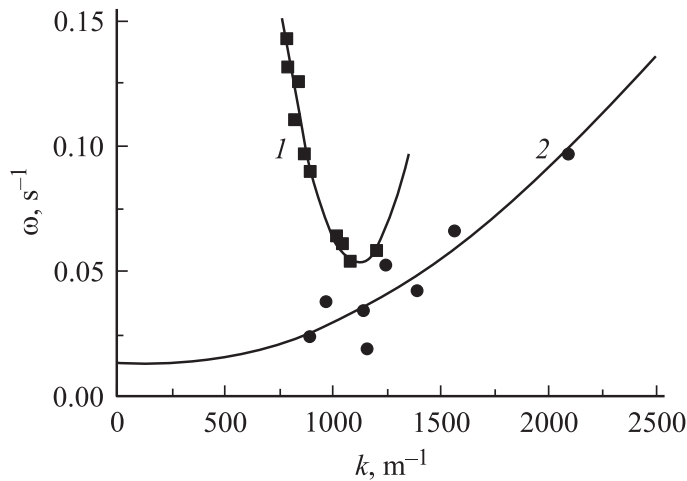
Среди перечисленных материалов отсутствуют металлы или сплавы с ОЦК решеткой. Поэтому в настоящей работе основное внимание было уделено исследованию закономерностей волновых процессов пластического течения в сплаве Fe–3%Si в моно- и поликристаллическом состояниях. Образцы растягивались на испытательной машине „Instron-1185“ с постоянной скоростью деформации  $\dot{\varepsilon} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  при 300 К. Методика анализа локализации деформации не отличалась от описанной ранее [11,12]. Начиная с предела текучести и вплоть до разрыва с периодичностью 15 s (через 0.2% общей деформации), методом двухэкспозиционной спекл-интерферометрии [11] производилась регистрация полей векторов смещений  $\mathbf{r}(x, y)$  на фронтальной поверхности исследуемых образцов. Путем численного дифференцирования по координатам вычислялись распределения продольных, поперечных, сдвиговых и поворотных компонент тензора пластической дисторсии  $\beta_{ij}$  для всех точек наблюдаемой поверхности образца. Далее распределения локальных деформаций строили по всему образцу или вдоль его осевой линии для разных моментов времени или разных значений общей деформации. Наиболее удобной компонентой тензора  $\beta_{ij}$  является локальное удлинение в направлении оси растяжения образца  $\varepsilon_{xx} = du/dx$  ( $u$  — компонента вектора  $\mathbf{r}$  в направлении оси растяжения  $x$ ). Построение и анализ пространственных  $\varepsilon_{xx}(x, y)$  и пространственно-временных  $\varepsilon_{xx}(x, t)$  картин позволяют определить положение зон локализации деформации и проследить за их эволюцией во времени и дают также возможность сравнения их со стадиями кривой пластического течения  $\sigma(\varepsilon)$ .



**Рис. 1.** Экспериментальные точки моно- и поликристаллического Fe–3%Si на обобщенной зависимости скорости автоволн от коэффициента деформационного упрочнения на стадии линейного упрочнения [5-8].

В монокристаллах и поликристаллах Fe–3%Si пластическое течение локализовано в определенных активных зонах образца, закономерно расположенных по его длине. При этом в зонах между такими очагами деформация практически не развивается, а активные зоны на стадии линейного упрочнения движутся вдоль оси образца. Фиксируя пространственные положения  $X$  максимумов локализации компоненты  $\varepsilon_{xx}$  на оси растяжения в зависимости от времени  $t$ , по наклону зависимости  $X(t)$  определяется скорость движения  $V_{aw}$  [6,8].

Оказалось, что точки для ОЦК моно- и поликристаллов Fe–3%Si располагаются достаточно близко к общей зависимости  $V_{aw}(\theta)$ , как это показано на рис. 1. Таким образом, получено дополнительное подтверждение справедливости уравнения (1). Возможная природа зависимости  $V_{aw} \sim \theta^{-1}$  на линейной стадии упрочнения описана в [6,8]. Обсуждая природу волновых процессов пластической деформации твердых тел, следует, прежде всего, сравнить их с подробно описанными в литературе волнами пластичности [13]. Однако форма зависимости  $V_{aw}(\theta)$  указывает на принципиальное отличие наблюдаемых волновых процессов от этих волн, поскольку скорость последних  $V_{pw} \approx \sqrt{\theta/\rho_0} \sim \sqrt{\theta}$  [13]



**Рис. 2.** Обобщенный закон дисперсии фазовых автоволн на стадии линейного деформационного упрочнения: 1 — для поликристаллического Al; 2 — для монокристаллического Fe–18% Cr–13% Ni с содержанием азота 0.35% и 0.5%, Fe–13% Mn с содержанием углерода 0.93% и 1.03% и Fe–3% Si.

( $\rho_0$  — плотность вещества). Различие форм зависимостей  $V_{aw} \sim \theta^{-1}$  и  $V_{pw} \sim \sqrt{\theta}$  позволяет считать, что в наших экспериментах обнаружен новый тип волновых процессов, связанных с пластической деформацией, — волны локализации пластического течения.

Экспериментальная методика получения данных о скорости движения очагов пластического течения позволяет независимо определять как длину волны  $\lambda$  (волновое число  $k = 2\pi/\lambda$ ), так и временной период  $T$  (частоту  $\omega = 2\pi/T$ ) наблюдаемых волновых процессов [6]. Для исследованных материалов удалось установить, что связь между волновым числом  $k$  и круговой частотой  $\omega$  имеет вид (рис. 2)

$$\omega = ak^2 + bk + c, \quad (2)$$

где константы  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , различные для каждой группы материалов, приведены в таблице. Полученное соотношение (2) представляет собой закон дисперсии для наблюдаемых на стадии линейного упрочнения волновых процессов локализованного пластического течения, который

Константы в дисперсионном соотношении (2) для исследуемых материалов

Металл/сплав	Тип решетки	$a, \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$b, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$c, \text{s}^{-1}$
Al (1)	ГЦК	$7.9 \cdot 10^{-7}$	$-1.7 \cdot 10^{-3}$	1.05
Сплавы Fe (2)	ГЦК/ОЦК	$2.2 \cdot 10^{-8}$	$-5.6 \cdot 10^{-6}$	0.01

может быть сведен к канонической форме  $\omega = 1 + k^2$  [14]. Квадратичный характер зависимости (2) характерен для так называемого нелинейного уравнения Шредингера [15], часто используемого для описания процессов самоорганизации в нелинейных системах.

Перечисленные закономерности не позволяют отождествить наблюдаемые пространственно-временные периодические закономерности неоднородного пластического течения ни с упругими волнами, ни с волнами пластичности. В таком случае наиболее вероятна их связь с автоволновыми явлениями (процессами самоорганизации или упорядочения, самопроизвольно возникающими в деформируемой среде [16]).

Проблема самопроизвольного рождения структур (в том числе деформационных) в открытых системах, через которые проходит поток энергии, является одной из центральных в современной физике. Локализация пластической деформации может и должна рассматриваться как новый тип автоволнового процесса, спонтанно возникающего в деформируемой среде в таких условиях. Закономерности процессов самоорганизации подобного типа ранее исследовались в физических, химических и биологических системах. Сравнение показывает, что наблюдаемые при деформации автоволны локализации, в общем, аналогичны фундаментальному понятию синергетики — диссипативным структурам, введенным авторами [4].

В ходе непрерывного растяжения образца с постоянной скоростью могут последовательно сменять друг друга несколько типов волновых процессов, причем существует однозначное соответствие между типом волновой картины и законом деформационного упрочнения, действующим на данной стадии процесса. Смена макроскопических картин локализации пластического течения может рассматриваться как результат перестройки автоволновых картин. В основе такой перестройки лежат процессы, протекающие на более мелкомасштабном (дислокационном) уровне деформируемой системы.

## Список литературы

- [1] *Gilman J.J.* // Mech. Mat. 1994. V. 17. P. 83–96.
- [2] *Zuev L.B.* // Ann. Phys. 2001. V. 10. N 11–12. P. 965–984.
- [3] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С.* // Успехи физ. мет. 2002. Т. 3. № 3. С. 237–304.
- [4] *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. М.: Мир, 1990. 336 с.
- [5] *Баранникова С.А.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 10. С. 138–140.
- [6] *Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Зариковская Н.В.* и др. // ФТТ. 2001. Т. 43. № 8. С. 1423–1427.
- [7] *Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A.* // Int. J. Plasticity. 2001. V. 17. N 1. P. 47–63.
- [8] *Данилов В.И., Баранникова С.А., Гончиков К.В.* и др. // Кристаллография. 2002. Т. 47. № 4. С. 730–736.
- [9] *Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Зариковская Н.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 5. С. 57–63.
- [10] *Данилов В.И., Заводчиков С.Ю., Баранникова С.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 1. С. 26–30.
- [11] *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328 с.
- [12] *Zuev L.B., Polyakov S.N., Gorbatenko V.V.* // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 1197–1207.
- [13] *Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. М.: ИИЛ, 1955. 192 с.
- [14] *Косевич А.М., Ковалев А.С.* Введение в нелинейную физическую механику. Киев: Наук. думка, 1989. 297 с.
- [15] *Додд Р., Эйлбек Д., Гиббон Д., Моррис Х.* Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988. 694 с.
- [16] *Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г.* Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987. 240 с.