

Кинетика периодических процессов при пластическом течении

© С.А. Баранникова, Л.Б. Зуев, В.И. Данилов

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 634021 Томск, Россия

(Поступила в Редакцию 16 ноября 1998 г.)

Установлена зависимость скорости самосогласованного движения очагов неоднородной пластической деформации при растяжении монокристаллов γ -Fe от коэффициента деформационного упрочнения. Показано, что на стадии линейного упрочнения связь между скоростью и указанной величиной является обратно пропорциональной. Предложена интерпретация наблюдаемых закономерностей на базе представления об автоволновом характере пластического течения твердых тел и самоорганизации в деформируемой среде. Установлен закон дисперсии автоволн пластической деформации.

При экспериментальных исследованиях неоднородности пластической деформации моно- и поликристаллов была надежно установлена тесная связь между наблюдаемой формой неоднородности и характером деформационного упрочнения материала на исследуемой стадии. Наблюдаемые периодические закономерности распределения плотности дислокаций и деформации по образцу были интерпретированы [1,2] как результат самоорганизации деформируемой среды в форме различных видов автоволн. Подобное объяснение [2] базируется на представлении о том, что деформируемая среда является активной, т.е. способной к самоорганизации в смысле самопроизвольного возникновения ее пространственной, временной или функциональной неоднородностей [3]. С общих позиций теории открытых систем [4] такая ситуация вполне реальна для деформируемых тел, через которые при нагружении проходит поток энергии от нагружающего устройства.

Наблюдаемые зоны локализации пластического течения движутся вдоль образца при нагружении со скоростью $\sim (10^{-4} \dots 10^{-5})$ м/с [5,6]. До сих пор, однако, остается открытым вопрос о факторах, определяющих их скорость перемещения V . При этом особый интерес представляет случай, когда при пластической деформации возникает совокупность эквидистантно расположенных очагов локализации деформации, синхронно движущихся вдоль образца. Задача настоящей работы — установление и анализ возможной формы зависимости V в такой ситуации от силовых параметров процесса нагружения, в частности от общепринятой динамической характеристики — коэффициента деформационного упрочнения материала $\theta = d\sigma/d\varepsilon$.

1. Условия эксперимента

Как показывают ранее опубликованные данные [2,5,6], устойчивая периодическая картина неоднородности пластической деформации наблюдается на линейных стадиях деформационного упрочнения моно- и поликристаллов при условии $\theta = \text{const}$. В этом случае в образце формируется эквидистантная последовательность из 3...6 очагов пластического течения, удаленных друг от

друга на расстояние 5...10 мм и самосогласованно движущихся с постоянной скоростью V . Для экспериментов по выяснению влияния коэффициента деформационного упрочнения на V необходим материал, в котором за счет сравнительно умеренных воздействий без существенного изменения структуры можно эффективно изменять θ , сохраняя линейную связь между деформацией и напряжением. В этом смысле оказались удобными монокристаллы высоколегированного γ -железа, выращенные из расплава методом Бриджмена и сохраняющие за счет высокого содержания Ni ГЦК решетку при 300 К. Выбором ориентации оси растяжения ([100] или [111]) и дополнительным диффузионным насыщением азотом до 0.3...0.5 wt.% у них удалось получить достаточно длинные линейные стадии течения с коэффициентом деформационного упрочнения, меняющимся в пределах $1.2 \cdot 10^3 \leq \theta \leq 4.2 \cdot 10^3$ МПа, т.е. $\sim (0.5 \dots 2.0) 10^{-2} G$ (G — модуль сдвига). Образцы растягивались с постоянной скоростью $d\varepsilon/dt = 3.4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ на испытательной машине "Instron-1185".

2. Результаты эксперимента

Выполненные с применением описанной в [2,5] методики спеклинтерферометрии исследования деформации таких монокристаллов позволили определить поле компонент тензора пластической дисторсии по всему деформируемому образцу, выявить конфигурацию зон локализации деформации и установить общие для стадий линейного деформационного упрочнения закономерности. 1) наблюдаемая пространственно-временная картина неоднородности пластического течения во всех случаях имеет форму бегущей вдоль образца с постоянной скоростью волны (рис. 1), 2) скорость распространения такой волны $2 \cdot 10^{-5} \leq V \leq 7 \cdot 10^{-5}$ м/с, 3) скорость распространения $V \sim \theta^{-1}$ (рис. 2), т.е.

$$V(\theta) = V_0 + J/\theta. \quad (1)$$

Подобная форма зависимости указывает на принципиальное отличие наблюдаемых волновых процессов

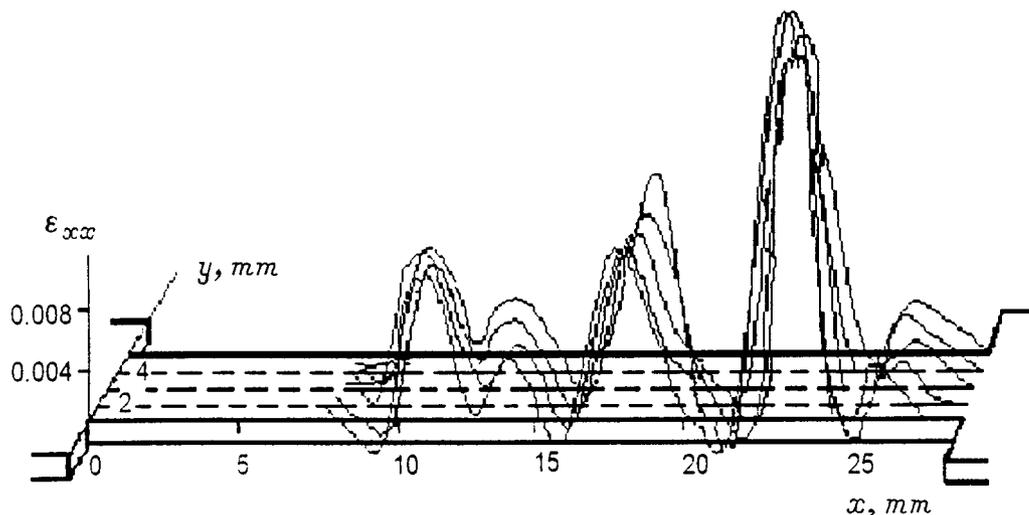


Рис. 1. Типичная картина распределения деформаций по образцу при растяжении на стадии линейного упрочнения.

от известных волн пластичности [7], скорость которых $V_p = (\theta/\rho_0)^{1/2}$, т.е. $V_p \sim \theta^{1/2}$ (ρ_0 — плотность материала). Простая оценка к тому же показывает, что $V_p \gg V$. Далее можно предположить, что коэффициент пропорциональности J , размерность которого $[\text{Pa} \cdot \text{m/s}] = [\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$ (здесь у θ размерность σ), имеет смысл потока энергии, проходящего через деформируемый объект, закрепленный в нагружающем устройстве. Все это заставляет отнести наблюдаемые пространственно-временные периодические закономерности неоднородного пластического течения к классу автоволновых явлений [8] (процессов самоорганизации в деформируемой среде), альтернативных по отношению к обычным волнам. При этом, как известно [3,4,8], именно наличие потока энергии, протекающего через среду, делает возможным процессы самоорганизации в ней. Выяснение характера связи $V(\theta)$ может способствовать пониманию природы наблюдаемых при деформации периодических процессов по крайней мере с помощью сравнения его с формой аналогичных соотношений для упругих и пластических волн.

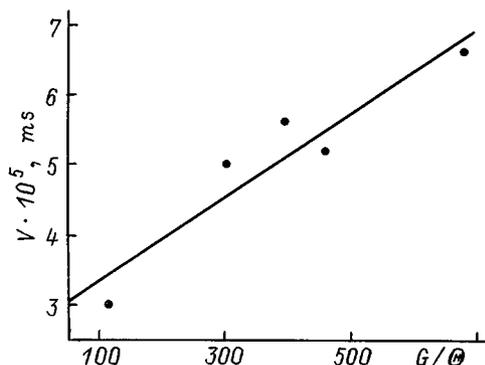


Рис. 2. Зависимость скорости распространения автоволн от коэффициента деформационного упрочнения монокристаллов.

3. Обсуждение результатов

Для понимания физического смысла зависимости (1) воспользуемся представлением о природе величины θ , предложенным Ройтбурдом [9], который рассматривал коэффициент деформационного упрочнения как отношение энергий

$$\theta/G \sim W/Q \approx Gb^2\rho_s/\sigma bL\rho_m. \quad (2)$$

Здесь $W \approx Gb^2\rho_s$ — энергия дислокаций, накопленных в ходе пластического деформирования в единице объема, а $Q \approx \sigma bL\rho_m$ — энергия, рассеянная в тепло подвижными дислокациями также в единице объема (b — вектор Бюргера дислокаций, ρ_s и ρ_m — плотности накопленных и подвижных дислокаций соответственно, L — длина их пробега). При $J = \text{const}$ увеличение плотности накопленных дефектов (рост деформационного упрочнения), согласно (1), ведет к снижению скорости распространения автоволн V . Напротив, увеличение количества тепловой энергии, рассеянной в образце, приводит к его разогреву, что повышает вероятность элементарных актов термически активированной пластической деформации и способствует росту V . Подобное разделение вкладов согласуется с двухфакторной моделью процессов самоорганизации (генерации автоволн) в активной среде, изложенной в [8]. Известно, что в общем случае реализация такого процесса возможна при одновременном действии автокаталитического и демпфирующего факторов с различными кинематическими и пространственными характеристиками. Данные о форме зависимости $V(\theta)$ позволяют дополнительно обосновать выбор в качестве активирующего фактора пластической деформации, а в качестве демпфирующего — упругих напряжений. В соответствии со сказанным величина $Q \sim L$, связанная с движением дислокаций при деформации, служит автокаталитическим фактором процесса. Напротив, рост

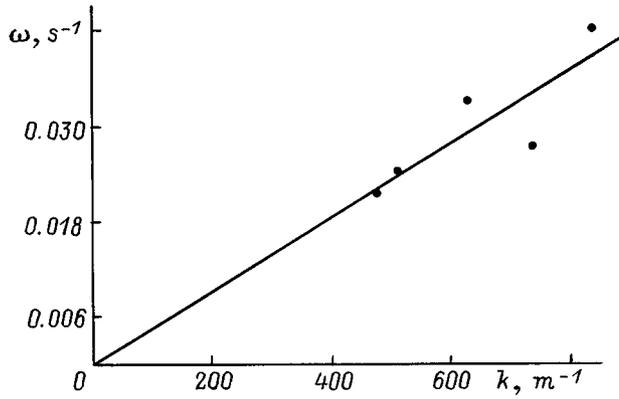


Рис. 3. Дисперсионное соотношение для автоволн пластической деформации.

величины $W \sim \rho_s$ приводит к увеличению внутренних напряжений дислокационной природы ($\sigma_i \approx Gb\rho_s^{1/2}$), т.е. W действительно следует рассматривать как демпфирующий фактор. Подобное противопоставление ролей пластической деформации и упругих напряжений в самоорганизации пластического течения было впервые введено Николисом и Пригожиным [10] и далее применено нами в работах [2,6,11]. В рамках такого подхода линейная стадия деформационного упрочнения отвечает установившемуся соотношению автокаталитического и демпфирующего факторов, контролирующих кинетику самоорганизации в активной среде.

Из полученных экспериментальных данных удалось получить закон дисперсии наблюдавшихся автоволн, длина которых λ непосредственно определялась по картинкам, аналогичным представленным на рис. 1, а частота периодического процесса ω по их последовательностям. На рис. 3 показана зависимость ω от волнового числа $k = 2\pi/\lambda$. Ее линейный характер указывает на отсутствие дисперсии в изученном случае, что характерно для автоволновых процессов в нелинейных [12] или активных [4,8] средах. Численная оценка показывает, что наклон прямой $\omega(k)$ на рис. 3 $\omega/l \approx V_0$. В этом случае (1) можно преобразовать к виду

$$V \approx \omega/k + J/\theta, \quad (3)$$

где первое слагаемое справа характеризует бездисперсионный характер автоволн в деформируемой среде, а второе отражает влияние внешних условий деформирования на величину V . В такой случае под V следует понимать скорость передачи сигнала в деформируемой среде, подвергаемой пластическому растяжению. С этой скоростью в системе распространяется информация о начале деформационного процесса в локализованном объеме.

Таким образом, соотношения, установленные для скорости $V(\theta)$ и дисперсии $\omega(k)$ периодических колебательных процессов пластического течения, весьма существенны для понимания их природы. Прежде всего, они

позволяют уверенно исключить наблюдаемые эффекты из класса волновых и рассматривать их как процессы самоорганизации в деформируемой среде (автоволновые процессы). Далее количественные параметры соотношения $V(\theta)$ дают возможность учесть также роль управляющих процессом самоорганизации факторов и их связь с условиями нагружения. Наконец, бездисперсионность (линейный закон дисперсии) автоволн объясняет наблюдаемую устойчивость подобных структур в ходе линейной стадии процесса пластического течения. В этом случае причина последовательного перехода одного типа автоволн в другой по мере смены стадий пластического течения связана с изменением состояния (структуры) деформируемой среды. При этом существенно иметь в виду, что генерация наблюдаемых систем очагов локализованной деформации происходит путем их рождения из хаотического распределения локальных деформаций, характерного для переходных стадий процесса, т.е. представляет собой процесс упорядочения в деформируемой среде.

Список литературы

- [1] Г.А. Малыгин. ФТТ **37**, 1, 3 (1995).
- [2] L.B. Zuev, V.I. Danilov. Int. Solids Structure **34**, 29, 3795 (1997).
- [3] Г. Хакен. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. Мир, М. (1991). 240 с.
- [4] Ю.Л. Климонтович. Статистическая теория открытых систем. ТОО "Янус", М. (1995). 534 с.
- [5] В.И. Данилов, Л.Б. Зуев, Н.М. Мних, В.Е. Панин, Л.В. Шершова. ФММ **3**, 188 (1991).
- [6] L.B. Zuev, V.I. Danilov, N.V. Kartashova, S.A. Barannikova. Mater. Sci. Eng. **A234–236**, 699 (1997).
- [7] Г. Кольский. Волны напряжений в твердых телах. ИИЛ, М. (1995). 192 с.
- [8] В.А. Васильев, Ю.М. Романовский, В.Г. Яхно. Автоволновые процессы. Наука, М. (1987). 280 с.
- [9] Физика деформационного упрочнения монокристаллов / Под ред. В.И. Старцева, В.З. Бенгус. Наук. думка, Киев (1972). С. 5.
- [10] Г. Николис, И. Пригожин. Познание сложного. Мир, М. (1990). 342 с.
- [11] Л.Б. Зуев, В.И. Данилов. ФТТ **39**, 8, 1399 (1997).
- [12] А.М. Косевич, А.С. Ковалев. Введение в нелинейную физическую механику. Наук. думка, Киев (1989). 315 с.