

УДК 669.71:620.111.3

АВТОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

© 2011 г.

Л.Б. Зуев, Ю.А. Хон, В.И. Данилов, С.А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

lbz@ispms.tsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Экспериментальные данные показали, что пластическая деформация на макромасштабном уровне развивается локализовано, принимая форму автоволн, тип которых определяется законом деформационного упрочнения, действующим на соответствующей стадии пластического течения. В исследовании предложено объяснение процесса формирования автоволн локализованной пластичности при растяжении с постоянной скоростью, основанное на представлении о самоорганизации дефектной структуры деформируемой среды. При пластической деформации изменение состояния среды определяется согласованным перераспределением упругих напряжений и движением очагов локализованной пластичности, возникающих на любой стадии процесса. Первый процесс контролируется скоростью звука, а второй – скоростью автоволн. Сказанное указывает на связь микроскопических решеточных характеристик деформируемых кристаллов с макрохарактеристиками локализованного пластического течения, хотя соотношение пространственных масштабов в этом случае $\lambda/r_{ion} \approx 10^8$.

Ключевые слова: пластичность, деформация, волны, деформационное упрочнение, дефекты, локализация.

Экспериментальные исследования кинетики пластической деформации твердых тел, среди которых были моно- и поликристаллы чистых металлов и сплавов с ГЦК, ОЦК, ГПУ и тетрагональной кристаллической решеткой, а также щелочно-галоидные кристаллы, керамика и горные породы, позволили установить, что пластическое течение твердых деформируемых тел развивается локализовано на всех своих стадиях, начиная от предела текучести и заканчивая разрушением [1]. Неоднородность пластического течения является характерной чертой необратимого изменения формы твердых тел на всех масштабах наблюдения. Как показано в экспериментальных исследованиях [1], пластическая деформация твердых тел развивается локализовано, а картины локализации на разных стадиях пластического течения однозначно связаны с действующими на них законами деформационного упрочнения. Особенно ярко локализация проявляется на макроскопическом масштабном уровне, принимая форму автоволновых процессов разных типов. Согласно [2] автоволны – это самопроизвольно возникающие периодические в пространстве и времени процессы, не требующие для своего возбуждения периодического или импульсного временного воздействия. На рис. 1 изображена автоволна локализованной деформации, распространяющаяся вдоль образца при растяжении. На вертикальной оси – компонента тензора пластической дисторсии, со-

ответствующая локальному удлинению, определенная методикой спекл-фотографии.

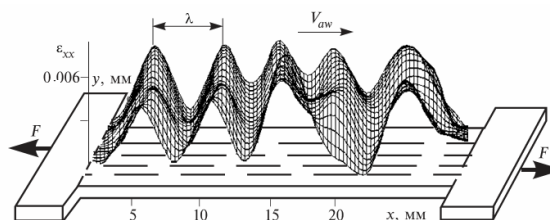


Рис. 1

Экспериментально автоволны локализации пластического течения наблюдались в наших исследованиях при использовании специально разработанной для этих целей методики двухэкспозиционной спекл-фотографии [1], позволяющей экспериментально определять поле векторов смещения в деформируемом образце и рассчитывать все компоненты тензора пластической дисторсии. Автоволны локализованного пластического течения характеризуются длиной $3 \leq \lambda \leq 15$ мм, скоростью распространения $10^{-5} \leq V_{aw} \leq 10^{-4}$ м/с, дисперсионным соотношением квадратичного типа $\omega = 1 \pm k^2$. Используя эту методику, удалось установить, что в процессе пластического течения деформируемое тело самопроизвольно расслаивается на чередующиеся активно деформирующиеся и недеформирующиеся зоны с характерным макромасштабом неоднородности $\sim 10^{-2}$ м, кото-

рые могут перемещаться или быть неподвижными. Кинетика деформации в каждой зоне индивидуальна, но согласована с деформационными процессами в соседних зонах.

При растяжении с постоянной скоростью на стадиях легкого скольжения и линейного деформационного упрочнения, на которых коэффициент деформационного упрочнения постоянен, в исследованных моно- и поликристаллах возникает специфическая периодическая пространственно-временная картина – автоволна локализованной деформации. В этих условиях вдоль оси образца с постоянной скоростью $V_{ав}$ синхронно движется группа зон локализации пластической деформации, расстояние между которыми остается постоянным на протяжении стадий легкого скольжения или линейного деформационного упрочнения. Важными характеристиками этого типичного автоволнового процесса развития локализованного пластического течения [1] являются скорость распространения автоволн $V_{ав}$ и их закон дисперсии.

Дисперсионное соотношение квадратичного типа характерно, например, для периодических процессов, являющихся решениями нелинейного уравнения Шредингера, уравнений, описывающих самоорганизацию в активных нелинейных средах. По этой причине вопрос о природе подобного закона дисперсии достоин внимательного анализа. Для анализа ситуации общую локальную деформацию среды ϵ_{ij} представим в виде

$$\epsilon_{ij}(r, t) = \epsilon_{ij}^e(r, t) + \epsilon_{ij}^r(r, t) + \epsilon_{ij}^{ir}(r, t), \quad (1)$$

где ϵ_{ij}^e – упругая, ϵ_{ij}^r – обратимая неупругая, ϵ_{ij}^{ir} – необратимая неупругая деформации, r – радиус-вектор рассматриваемой точки в деформируемом образце, t – время. Под точкой подразумевается объем, содержащий достаточно большое число атомов. Так как неупругая деформация имеет очаговый характер, ϵ_{ij}^r и ϵ_{ij}^{ir} запишем в виде

$$\epsilon_{ij}^r(r, t) = \epsilon_{ij}^q q(r, t), \quad \epsilon_{ij}^{ir}(r, t) = \epsilon_{ij}^p p(r, t), \quad (2)$$

где q и p определяют доли объема, занятые очагами обратимой и необратимой неупругой деформации соответственно, а величины ϵ_{ij}^q и ϵ_{ij}^p в (2) соответствуют средним значениям этих деформаций в соответствующих очагах и определяются механизмами неупругой деформации. В методе фазового поля [3] переменные $p(r, t)$ и $q(r, t)$, ха-

рактеризующие изменение внутренней структуры материала при деформации, имеют смысл параметров порядка и считаются непрерывными функциями координат и времени. При $q = 0, p = 0$ образец испытывает только упругую деформацию, а при $q > 0, p > 0$ – однородную неупругую. Локализованному в пространстве решению $p = p(r, t)$ соответствует локализованная пластическая деформация.

Чтобы найти кинетические уравнения для параметров порядка p и q , применим локальное приближение неравновесной термодинамики, включив p и q в число термодинамических переменных и считая, что свободная энергия единицы объема f есть функция T, ϵ_{ij}, p и q , а ее изменение

$$df = -sdT - \sigma_{ij}d\epsilon_{ij} + Adp + Bdq. \quad (3)$$

Здесь величины локальной энтропии s , тензора упругих напряжений ϵ_{ij} , а также термодинамические силы A и B , соответствующие параметрам порядка p и q , зависят от тех же переменных, что и f . При $T = \text{const}$ и скоростях движения среды $v_i/c_s \ll 1$ (v_i – компоненты скорости движения среды в декартовой системе координат x_1, x_2, x_3 ; c_s – скорость звука) можно записать уравнения эволюции параметров порядка в виде:

$$\tau_p \dot{p} = X(p, q, T, \epsilon_{ij}) + \tau_p \nabla [D_{pp} \nabla p + D_{pq} \nabla q], \quad (4)$$

$$\tau_q \dot{q} = Y(p, q, T, \epsilon_{ij}) + \tau_q \nabla [D_{qq} \nabla q + D_{qp} \nabla p], \quad (5)$$

где X и Y – безразмерные функции источников и стоков, τ_p и τ_q – характерные времена изменения параметров порядка p и q соответственно, D_{ij} – коэффициенты переноса ($i, j = p, q$). Соотношения (4) и (5) являются обобщением уравнений, описывающих процессы самоорганизации в активных средах [3] на случай деформируемой среды. Анализ уравнений (4) и (5) показывает, что автоволны имеют квадратичный закон дисперсии, а пространственное распределение $p(r, t)$ подобно приведенному на рис. 1.

Список литературы

1. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука, 2008. 327 с.
2. Земсков В.П., Лоскутов А.Ю. // ЖЭТФ. 2008. Т. 134, №2(8). С. 406–412.
3. Wang Yunzhi, Li Ju. // Acta Materialia. 2010. V. 58. P. 1212–1235.

THE AUTOWAVE MODEL OF LOCALIZED PLASTICITY

L.B. Zuev, Yu.A. Khon, V.I. Danilov, S.A. Barannikova

It is found experimentally that the plastic deformation would localize on the macro-scale level, which involves generation of auto-waves whose type is determined by the acting law of work hardening. By addressing the localized plasticity auto-waves occurring in a solid under constant-rate loading, we have invoked the concept of self-organization to account for a change in the defect structure of the deforming medium. Thus the plastically deforming medium would undergo a change of state due to the concerted redistribution of elastic stresses and to the motion of localized plasticity nuclei emergent at all the flow stages. The former process is controlled by the sound rate and the latter, by the auto-wave velocity. The above suggests that the microscopic characteristics of the crystal lattice are related to the macroscopic characteristics of the localized plastic flow, with the spatial scales being in the ratio $\lambda/r_{ion} \approx 10^8$.

Keywords: plasticity, deformation, waves, work hardening, defects, localization.