

УДК 69.4, 539.376, 539.4.015

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В НАГРУЖЕННОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ КАК МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОЙ СИСТЕМЕ

© 2011 г.

В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

paninve@ispms.tsc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

На основе физической мезомеханики и неравновесной термодинамики развита теория нелинейных волн локализованной пластической деформации (НВПД) в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. Показано, что распространение всех видов НВПД в деформируемом твердом теле сопровождается снижением его механических характеристик. Специальной обработкой поверхностных слоев твердых тел можно блокировать развитие в них НВПД и существенно увеличить все их механические свойства.

Ключевые слова: нелинейные волны, пластическая деформация, разрушение, физическая мезомеханика, неравновесная термодинамика.

Использование в настоящей работе сканирующих приборов высокого разрешения позволило обнаружить распространение в поверхностных слоях сдвигов, каналированных вдоль сопряженных направлений максимальных касательных напряжений. Эти каналированные сдвиги периодически генерируют макрополосы локализованной пластической деформации в объеме материала. Данный процесс фронтально распространяется вдоль оси нагружения образца по схеме нелинейной волны локализованной пластической деформации.

На основе совместных подходов физической мезомеханики и неравновесной термодинамики развита теория нелинейных волн локализованной пластической деформации [1, 2]. Согласно [1], волновые уравнения для безразмерных величин потока J и плотности дефектов α имеют вид:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 J_\alpha^\mu}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 J_\alpha^\mu}{\partial x_\nu^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\partial \ln u_\alpha(x, l)}{\partial x_\mu} - \frac{1}{E} \frac{\partial \ln u_\beta}{\partial x_\nu} C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} - \frac{1}{E} P_\nu^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \alpha_\alpha^\mu}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \alpha_\alpha^\mu}{\partial x_\nu^2} = \varepsilon_{\mu\chi\sigma} \left\{ \frac{\partial^2 \ln u_\beta(x, t)}{\partial x_\chi \partial x_\nu} C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} - \frac{\partial P_\nu^\beta}{\partial x_\chi} C_{\alpha\beta}^{\mu\nu} \right\} \frac{1}{E} \quad (2)$$

при условии совместности источников

$$\frac{\partial N_\mu}{\partial t} + \varepsilon_{\mu lm} \frac{\partial M_m}{\partial x_l} = 0, \quad (3)$$

где M – правая часть выражения (1), N – правая часть выражения (2), $u(x, t)$ – неупругие смещения в волне неупругой локализованной деформации. Правая часть уравнения (1) характеризует источники потока дефектов. Они определяются скоростью квазиупругой деформации

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_\mu^\alpha E - E_\nu^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}) \frac{1}{E}.$$

В скобках представлена разность внутренних напряжений сжатия (растяжения) и сдвига, связанных с распределением напряжений в зоне концентратора напряжений. Релаксационные процессы перестроения дефектов (типа кластеров различных атомных конфигураций или их конгломератов) представлены в (1) членом $P_\nu^\beta C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}/E$. Правая часть уравнения (2) характеризует источник плотности деформационных дефектов. Им является завихренность

$$\varepsilon_{\mu\chi\delta} \frac{\partial}{\partial x} (E_\nu^\beta - P_\nu^\beta) \frac{C_{\alpha\beta}^{\mu\nu}}{E}$$

сдвиговой деформации, вызванной релаксацией сдвиговых напряжений в локальных зонах гидростатического растяжения.

Представленный уравнениями (1) и (2) волновой процесс может быть выражен аналитически для случая каналированной вдоль направления L локализованной деформации в заданных граничных условиях. Распределение пластического потока в локальной ($r < L$) области имеет вид:

$$\bar{J} = \frac{b_1 - b_2}{4\pi} \chi(s, t) \bar{b}(s, t) \left(\ln \frac{2L}{r} - 1 \right) - \nabla f, \quad (4)$$

где \bar{b} – вектор бинормали в локальной системе координат; χ – изменение кривизны области (изменение кривизны оси области), обусловленное внешней нагрузкой; t – касательная; s – текущее значение длины области; b_1, b_2 – модули «вектора Бюргерса» объемной трансляционной и приповерхностной или ротационной несовместности, соответственно; ∇f – градиентная часть потока, обусловленная сторонними источниками. Уравнение (4) определяет изменение формы области, ось которой – спиральная кривая с постоянным кручением $\tau = -2\nu$, где ν – локальная скорость поперечного формоизменения деформируемой области.

Примеры экспериментального наблюдения в сильно неравновесных тонких пленках представлены на рис. 1, на котором изображены двойные спирали мезополос локализованного пластического течения при растяжении тонких пленок Ti, нанесенных на полипропиленовую подложку, $T = 293$ К, $\varepsilon = 5\%$ (атомно-силовая микроскопия). Размер изображений на рисунке: а) 2.8×2.8 мкм, б) 11.2×11.2 мкм [2].

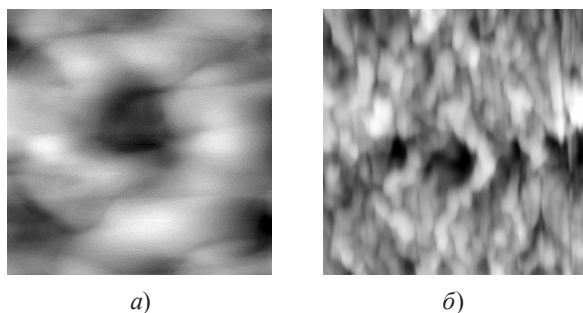


Рис. 1

Кривизна χ спирали является важным параметром каналированного волнового распространения локализованного пластического течения. Влияние этого параметра на форму спирали и локальную скорость поперечного формоизменения деформируемой области показано на рис. 2 ($\chi_1 < \chi_2$). Как видно из рис. 2а, при малой кривизне скорость поперечного формоизменения невелика, а спираль испытывает слабо выраженное кру-

чение с большой длиной поперечной волны. Такая картина наблюдается для развития пластического сдвига в сильно неравновесных поверхностных слоях. При увеличении кривизны длина поперечной волны резко уменьшается, а скорости поперечного формоизменения возрастают (рис. 2б). Это очень важный эффект, так как при отражении волны от границ слоистой среды скорость ν меняет знак на противоположный. При большой кривизне χ в зонах возникает гидростатическое растяжение, вызывающее возникновение трещин. Этот эффект, например, обуславливает развитие трещин в зонах экструзии материала из поверхностного слоя образцов при их циклическом нагружении, низкую пластичность структурно-неоднородных сред, растрескивание и отслоение хрупких покрытий.

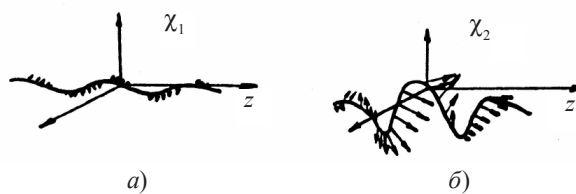


Рис. 2

Обсуждается влияние нелинейных волн локализованной пластической деформации на механические характеристики твердых тел при различных условиях нагружения. Показано, что распространение всех видов нелинейных волн локализованной пластической деформации в деформируемом твердом теле сопровождается снижением его механических характеристик. Специальной обработкой поверхностных слоев твердых тел можно блокировать нелинейные волны локализованной пластической деформации и существенно увеличить все их механические свойства.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (проект III.20.1.1), Президиумом РАН (проекты 12.2., 18.1., 11.1) и грантом НШ-5242.2010.1.

Список литературы

1. Егорушкин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1992. Т. 35, №4. С. 19–41.
2. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. // Физ. мезомех. 2010. Т. 13, №5. С. 7–26.

**NONLINEAR PLASTIC DEFORMATION WAVES IN A LOADED SOLID
AS A MULTISCALE HIERARCHY ORGANIZED SYSTEM**

V.E. Panin, V.E. Yegorushkin, A.V. Panin

Based on physical meso-mechanics and non-equilibrium thermodynamics, the theory of nonlinear waves of localized plastic deformation (NWLPD) in a deformed solid was developed as a multilevel hierarchically-organized system. Propagation of localized-plastic deformation waves of all types in a deformed solid deteriorates its mechanical properties. Special treatment of the surface layers of solids prevents the formation of NWLPD and considerably improves their mechanical properties.

Keywords: nonlinear waves, plastic deformation, fracture, physical meso-mechanics, non-equilibrium thermodynamics.