

## О МЕХАНИЗМЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО СДВИГА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Наймарк О.Б., Соковиков М.А. (Пермь)

### Abstract

*A characteristic feature of instability of plastic deformation appears to be the localized shear, which very often takes place under high velocity loading. Mathematical modeling of shock is carried out in the research. The analysis is based on the statistic-thermodynamical theory of solid with microcracks, worked out earlier. The proposed description of plastic shear instability includes tensorial structural parameter, which specifies the volume concentration and preferred orientation of defects.*

Для понимания физики и механики пластичности большой интерес представляет изучение локализации пластической деформации [1]. Ярким примером неустойчивости пластического сдвига следует считать формирование так называемых полос адиабатического сдвига при ударно-волновом нагружении материалов [2]. Полосы адиабатического сдвига возникают при взрывном нагружении, высокоскоростном соударении и играют значительную роль в ряде таких явлений, как дробление, эрозия, пробивание.

Локализация пластического сдвига является следствием резких структурных изменений в материалах и может сопровождаться полиморфными превращениями, фрагментацией, ориентационной и ротационной неустойчивостью.

Фрагментация структуры является естественной предпосылкой для зарождения и роста микротрещин. Микротрещины возникают в местах структурных несовершенств: участков с повышенной плотностью дислокаций, границ блоков и т.п. В настоящее время установлено, что зарождение и рост микротрещин играют существенную роль в процессе деформирования и разрушения материалов [3,4]. Особое значение в возникновении пластической неустойчивости имеют структурные изменения в материале, связанные с коллективными процессами в системе микротрещин.

Обсуждаемый класс явлений в последние годы исследуется нелинейной физикой деформирования и разрушения твердых тел [5-13], рассматривающей данные эффекты с позиций неравновесных кинетических переходов.

В настоящее время установлено, что деформирование и разрушение металлов сопровождается множественным зарождением и ростом микротрещин [14], кинетика которых существенно влияет на разрушение и релаксационные свойства [15].

В работах [5-7] предложена статистико-термодинамическая модель среды с микротрещинами. Система микротрещин описывается тензорным параметром плотности микротрещин  $\mathbf{p}_{ik}$ . Тензор  $\mathbf{p}_{ik}$  является независимой термодинамической координатой системы и характеризует объемную концентрацию и преимущественную ориентацию микротрещин. Определяющие уравнения пластически релаксирующего тела с микротрещинами имеют вид:

$$\sigma = \xi e^p - \alpha \dot{p}, \quad (1)$$

$$n = \gamma e^p - \beta \dot{p}, \quad (2)$$

$$\sigma'_{ik} = L_{iklm}^{(1)} e_{lm}^{p'} - L_{iklm}^{(2)} \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t}, \quad (3)$$

$$n'_{ik} = L_{iklm}^{(2)} e_{lm}^{p'} - L_{iklm}^{(3)} \frac{\Delta p'_{lm}}{\Delta t}. \quad (4)$$

Здесь  $\xi, \alpha, \beta, L_{iklm}^{(v)}$  - кинетические коэффициенты. В уравнениях (1)-(4):  $n = \frac{\partial F}{\partial p_{ik}}$  - термодинамическая сила, действующая на систему, когда значения  $p_{ik}$  отличаются от равновесного;  $\sigma'_{ik}, e_{ik}^{p'}, p_{ik}, p_{ik}$  и  $\sigma, e^p, p, p$  - бесследовые и изотропные компоненты напряжений, пластических деформаций, параметра плотности трещин и тензора  $n_{ik}$ ;  $\frac{\Delta p_{ik}}{\Delta t} = \frac{dp_{ik}}{dt} - \omega_{il} p_{ik} - \omega_{lk} p_{il}$  - тензорная производная по времени (производная по Яуманну [16]).

Уравнения состояния включают соотношения релаксационного типа для тензора напряжений (1),(3) и уравнения движения (2),(4) для параметра  $\mathbf{P}_{ik}$ . В этих уравнениях учтены "перекрестные" эффекты: влияние трещинообразования на релаксационные процессы и пластичности на кинетику роста  $\mathbf{P}_{ik}$ . В дальнейшем считаем, что пластические деформации подчиняются условию  $Sp e_{ik}^p = 0$ , а среднее напряжение определяется упругими составляющими тензора деформаций

$$\varepsilon_{ik}^e = \frac{1}{2} \mu (\sigma_{ik} - \sigma \delta_{ik}) + \frac{1}{9} K \sigma \delta_{ik} \quad (5)$$

( $\mu, K$ -модули сдвига и объемного сжатия).

Коллективные эффекты в ансамбле взаимодействующих микротрещин сопровождаются структурными изменениями, вызывающими локализацию пластической деформации. Одним из видов локализованной пластичности является адиабатический сдвиг при высокоскоростном нагружении. Наиболее ярко неустойчивость пластического сдвига проявляется при высокоскоростном налетании ударника конечного размера на преграду. При определенных условиях нагружения имеет место так называемое "выбивание пробки" [18]. При этом пластическая деформация (или разрушение) локализуются в узкой области, располагающейся по периметру цилиндрического ударника.

Рассмотрим задачу о динамическом нагружении круглой пластины при налетании цилиндрического ударника меньшего диаметра, имеющего общую с ударяемой пластиной ось симметрии.

При распространении волны сжатия эволюция системы микротрещин сопровождается слабым объемным взаимодействием дефектов, объемная составляющая  $\mathbf{p} = \frac{1}{3} Sp \mathbf{p}_{ik}$  мала и практически не влияет на развитие разрушения. Основной вклад в процесс разрушения вносят ориентационно-сдвиговые компоненты  $\mathbf{p}_{ik}$ , интенсивность которых характеризуется переменной  $\mathbf{p}' = (\mathbf{p}'_{ik} \mathbf{p}'_{ik})^{1/2}$ . Вводя для описания ансамбля

дефектов переменные  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{p}'$ , решаем систему определяющих уравнений (1)-(5) совместно с уравнениями движения. Функции  $n_{ik}$  и  $\mathbf{\Pi}$ , представлены в работе [7] через статистические интегралы.

Входящие в уравнения коэффициенты определялись из опытов по деформированию алюминия при ползучести [4].

В различных вариантах расчетов ударник рассматривался упругим и абсолютно жестким. Движение ударника в деформируемой среде описывается уравнением динамики твердого тела. При численной реализации использовалась явная разностная схема второго порядка точности [17].

Необходимым условием выбивания "пробки" является относительно высокая скорость ударника, его достаточно большие вес, плотность и длина. Локализация пластической деформации в форме образования характерной поверхности сдвига может произойти только тогда, когда кинетическая энергия ударника, превышающая некоторую предельную величину, передается мишени за достаточно малые времена, соизмеримые со временем распространения ударной волны по толщине пластины. При этом переданная энергия не распределяется по всему объему мишени, а практически целиком затрачивается на образование поверхности пластического сдвига.

Если при соударении количество переданной энергии ниже порогового уровня, поверхность пластического сдвига, имеющая вид "светлой гладкой области" [18], распространяется только на часть толщины пластины. Вторая область ("темная с крупными зернами") свидетельствует о разрушении в виде грубого излома. При увеличении скорости соударения величина сдвиговой зоны увеличивается до тех пор, пока не охватит всю толщину образца. При последующем увеличении скорости соударения характер разрушения не меняется. Пластическое течение неразрывно связано с процессом трещинообразования [3,4]. Последний влияет на пластические микродвиги и пластические ротации, которые можно связать с изменением ориентационной составляющей тензора плотности микротрещин, характеризуемой  $\mathbf{p}'_{ik}$ .

При достижении некоторых критических параметров нагружения происходит быстрое увеличение концентрации микротрещин; в системе микротрещин реализуется неравновесный (кинетический) переход, который сопровождается скачкообразным изменением бесследовой компоненты  $\mathbf{p}'_{ik}$ . На рис.1 представлено изменение параметра плотности трещин  $\tilde{r}'$  по толщине и радиусу пластины при  $t=0.7$  мкс. Кинетический переход приводит к резкому увеличению темпа релаксации напряжений, скачкообразному росту пластических деформаций, существенно изменяет структуру волнового фронта. Волновой профиль расщепляется на упругий предвестник и следующую за ним пластическую релаксационную волну. На рис.2 показано изменение  $\sigma_z$  по толщине и радиусу пластины в момент времени  $t=0.7$  мкс. Наиболее интенсивно процесс трещинообразования и релаксации идет в узких полосах по периметру ударника. Как следствие, скорости пластических деформаций в рассматриваемых зонах больше, чем в центре. Большая величина пластических деформаций вызвана характером распределения напряжений по контуру ударника и большим темпом кинетического перехода в системе микротрещин. На рис. 3 показано распределение интенсивности скоростей пластических деформаций при  $t=0.7$  мкс. По краям ударника формируются локальные области, в которых способность материала к пластической деформации резко возрастает.

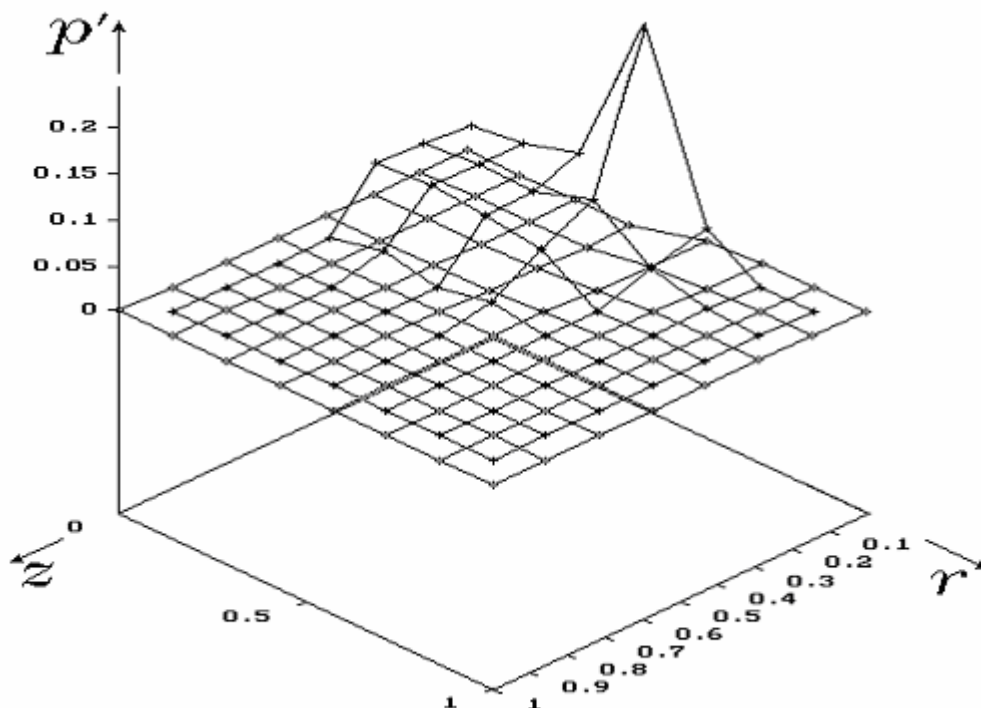


Рис.1. Изменение параметра плотности трещин  $\tilde{\rho}'$  по толщине и радиусу пластины при  $t=0.7$  мкс

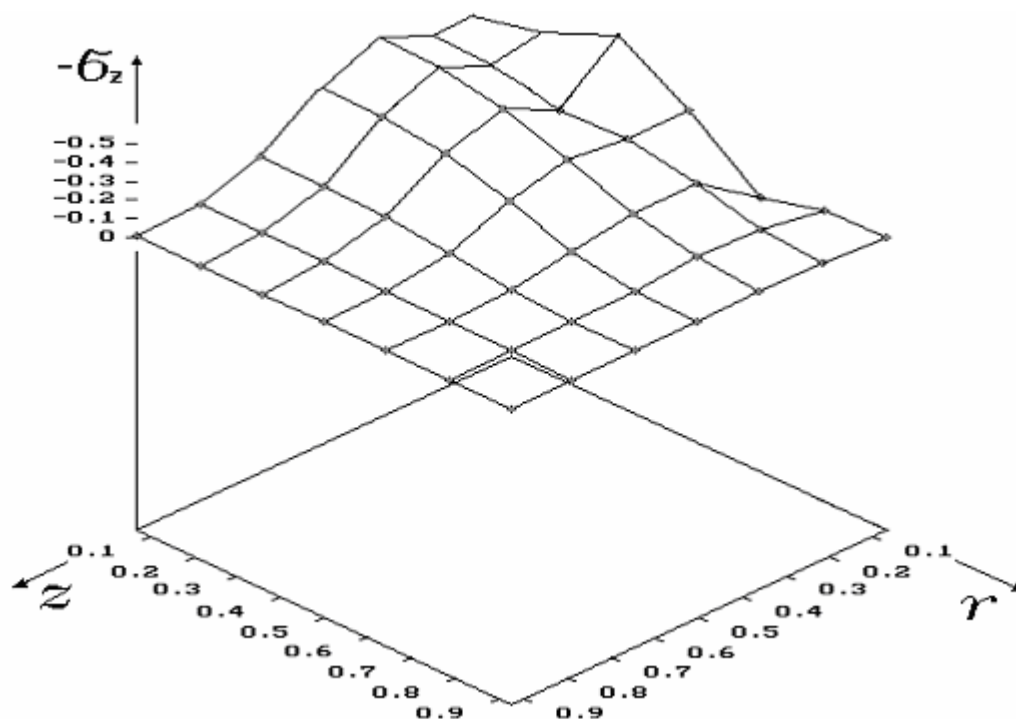


Рис.2. Изменение  $\sigma_z$  по толщине и радиусу пластины в момент времени  $t=0.7$  мкс

Локализованный и пороговый характер процесса выбивания "пробки" подтверждается экспериментальными результатами [18-20].

В областях неустойчивости пластического сдвига качественно ситуация аналогична фазовому переходу первого рода. Ориентационный переход сопровождается появлением более упорядоченной системы микротрещин и формированием направлений "легкого" скольжения. Для того чтобы область пластического сдвига проходила по всей толщине преграды, необходима реализация ориентационно-кинетического перехода последовательно в каждом сечении.

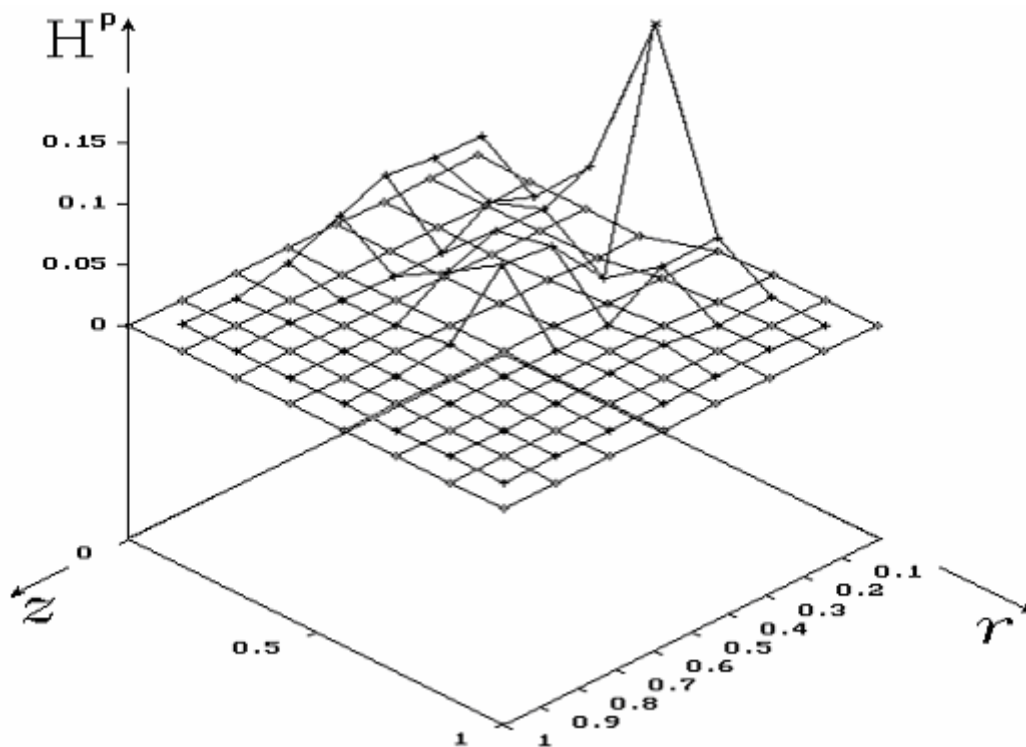


Рис.3. Распределение интенсивности скоростей пластических деформаций при  $t=0.7$  мкс

### Литература.

1. Надеждин Г.Н., Свечников В.Л., Воробьев Е.В. Локальная неустойчивость пластической деформации и разрушения конструкционных металлов и сплавов: Препринт/ Ин-т проблем прочности.-Киев, 1986 - 43с.
2. Роджерс Х.К., Шастри Н.В. Структурные изменения в сталях при адиабатическом сдвиге // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов.- М.: Металлургия, 1984.- С.301-309.
3. Бетехтин В.И., Савельев В.Н., Петров А.И. Кинетика накопления микроскопических разрывов сплошности в процессе испытания алюминия на долговечность и ползучесть// ФММ.- 1974.- Т.38, вып.3.- С. 834-842.

4. Гришаев С.Н., Наймарк О.Б. Исследование пластического разрыхления и кинетики разрушения материалов// Структурно-механические исследования композиционных материалов и конструкций. - Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984.- С.86-92.
5. Наймарк О.Б. О деформационных свойствах и кинетике разрушения твердых тел с микротрещинами// О термодинамике и деформировании твердых тел с микротрещинами : Препринт/ УНЦ АН СССР. - Свердловск, 1982. - С.3-34.
6. Наймарк О.Б., Давыдова М.М., Постных А.М. О деформировании и разрушении гетерогенных материалов с микротрещинами// Механика композитных материалов.- 1984. Вып.2.- С.271-278.
7. Наймарк О.Б., Давыдова М.М. О статистической термодинамике твёрдых тел с микротрещинами и автомодельности усталостного разрушения// Проблемы прочности.- 1986. N1.- С.91-95.
8. Наймарк О.Б., Беляев В.В. Исследования влияния микротрещин на кинетику разрушения и структуру ударных волн в металлах// Проблемы прочности.- 1989. N7.- С.46-53.
9. Наймарк О.Б., Беляев В.В. Кинетика накопления микротрещин и стадийность процесса разрушения при ударно-волновых нагрузках// Физика горения и взрыва.- 1989. N4.- С.115-123.
10. Naimark O.B., Belyaev V.V., The kinetics of microcrack accumulation and failure of solids in shock waves. In Adv. Res. Fract. Proc. 7th Int. Conf. Fracture (ICF-7), Houston, 1989, 6, 46-50.
11. Naimark O.B., Silbershmidt V.V. On the fracture of solids of solids with microcracks Eur.J.Mech.A/Solids, 1991, 10, N3, 1-13.
12. Наймарк О.Б., Соковиков М.А. Механизмы неустойчивости пластического сдвига при высокоскоростном нагружении материалов: Препринт/ УрО АН СССР.- Свердловск, 1991.- 47с.
13. Sokovikov M.A. Instability of plastic shear as structural-kinetic transtion in system of microcracks International Conference on diffusion and defects in solids.s 26 June-4 July,1991, Moscow-Perm, USSR, Abstracts II, 115.
14. Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел / Бетехтин В.И., Владимиров В.И., Кадомцев А.Г., Петров А.И.// Проблемы прочности.-1979. N7. С.38-45; 1979. N8. С.51-58; 1979. N9. С.3-10.
15. Бетехтин В.И., Владимиров В.И. Кинетика микроразрушения кристаллических тел// Проблемы прочности и пластичности твердых тел.- Л.:Наука, 1979.- С.142-154.
16. Седов Л.И. Введение в механику сплошной среды.- М.:Физматгиз, 1962.- 284 с.
17. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные схемы газовой динамики.- М.:Наука, 1975.- 351с.
18. Степанов Г.В., Сафаров Э.Г. Перфорация тонкой пластины ударом стержня с плоским торцом// Проблемы прочности.- 1988. N6. С.62-65.
19. Милейко С.Т., Кондаков С.Ф., Голофаст Е.Г. Об одном случае пробивания// Проблемы прочности.- 1979. N12. С.69-71.
20. Астанин В.В., Степанов Г.В. Энергетические характеристики разрушения алюминиевой плиты при пробивании стальным ударником// Проблемы прочности.- 1983. N10. С.93-95.