

М.А. Соколов

Институт механики сплошных сред УрО РАН

## АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО СДВИГА ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

### Abstract

*This paper offers the description of the mechanism of plastic shear instability under high speed impact which is the result of kinetic transition in the system of microshears. It is shown that plugging has a selfsimilar character due to kinetic peculiarities of microshear accumulation. Propagation of plastic shear instability bands as specific waves of plastic deformation with distinguishing features of solitary waves has been modeled numerically in the framework of the examined model.*

В литературе неустойчивость и локализация пластической деформации объясняются различными гипотезами. К числу основных гипотез, объясняющих это явление, относятся предположения о разупрочнении материала, связанном с влиянием: а) скорости деформации; б) деформации; в) температуры, вследствие диссипации энергии; г) структурных изменений. Исследованию данного явления посвящен также цикл работ по анализу устойчивости решений систем дифференциальных уравнений с использованием модельных определяющих соотношений.

Влиянию всех этих факторов посвящено значительное количество работ [1-14].

Значительное внимание вопросам неустойчивости и локализации пластической деформации уделено в работах научного направления, возглавляемого академиком В.Е.Паниным. В работах [15, 16, 17] развивается представление о деформируемом твердом теле как о многоуровневой системе, в которой пластическое течение развивается как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях: микро, мезо и макро.

Экспериментальные исследования микроструктуры полос адиабатического сдвига, проведенные в ряде работ, в частности [1], ясно указывают на то, что формирование полос адиабатического сдвига является результатом скачкообразных процессов в системе микросдвигов и пластических ротаций и тесно связано с изменением ориентаций зерен в узких полосах сдвига,

Обсуждаемый класс явлений в последние годы исследуется нелинейной физикой [18, 19, 20], рассматривающей данные эффекты с позиций неравновесных ориентационно-кинетических переходов.

В данной работе используется ранее разработанная теория [18], в которой методами статистической физики и термодинамики необратимых процессов изучается влияние микросдвигов на упругие и релаксационные свойства твердых тел. Определяющие уравнения сред с микросдвигами имеют следующий вид:

$$\sigma_{ik} = L_1 e_{ik}^p - L_2 \dot{p}_{ik}, \quad \Pi_{ik} = L_2 e_{ik}^p - L_3 \dot{p}_{ik}, \quad (1)$$

здесь  $p_{ik}$  – тензор, характеризующий интенсивность и преимущественную ориентацию микросдвигов;  $\Pi_{ik} = \frac{\partial F}{\partial p_{ik}}$  – термодинамическая сила, действующая на систему,

когда  $p_{ik}$  отличается от равновесного ( $F$  – свободная энергия среды с микросдвигами);  $\sigma_{ik}, e_{ik}^p$  – тензоры напряжений и скоростей пластических деформаций;  $L_i$  – кинетические коэффициенты, зависящие от  $p_{ik}$ . Определяющие уравнения материала (1) включают соотношения релаксационного типа для тензора напряжений и уравнения движения для параметра  $p_{ik}$ . В этих уравнениях учтены "перекрестные" эффекты: влияние микросдвигов на релаксационные процессы и пластичности на кинетику роста  $p_{ik}$ . В дальнейшем рассматривается случай, когда пластическая деформация подчиняется условию  $e_{ii}^p = 0$  (пластическая несжимаемость материала), а среднее напряжение  $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$  определяется через упругие составляющие тензора деформаций.

В рамках данной теории были определены характерные реакции материалов на образование дефектов и было сделано предположение, что эффекты неустойчивости пластического сдвига обусловлены ориентационно-кинетическими переходами в ансамблях микросдвигов.

Резкий переход к более упорядоченной дефектной структуре часто приводит к аномалиям деформационных свойств, которые могут проявиться, в частности, при высокоскоростном соударении ударника с преградой (выбивание пробки) [21,22].

Развитый подход был применен при численном моделировании механизмов неустойчивости, сопровождающихся выбиванием пробки. Для исключения влияния вторичных факторов процесс выбивания пробки рассматривался в упрощенной постановке и предполагалось, что кинетическая энергия ударника расходуется на ускорение пробки, диаметр которой принимается равным диаметру ударника, и на преодоление сил сопротивления сдвигу в узкой области по образующей пробки.

Уравнение баланса энергии в этом случае может быть представлено в виде

$$mv_0^2 / 2 = (m + \rho\pi R_p^2 h)v^2 / 2 + 2\pi R_p \int_0^h \tau u dz, \quad (2)$$

где  $m$  – масса ударника,  $\rho$  – плотность материала,  $R_p$  – радиус ударника и пробки,  $h$  – толщина пластины,  $v_0$  – начальная скорость соударения,  $v$  – текущая скорость пробки и ударника,  $\tau$  – напряжение сдвига,  $u$  – перемещение пробки как единого целого.

Так как ширина области сдвига точно неизвестна, для оценки скорости деформации сдвига в цилиндрической области по периметру ударника  $\dot{\gamma}$  использовалось соотношение

$$\dot{\gamma} = 0,5v / R_p. \quad (3)$$

Уравнения (2),(3) были решены численно совместно с уравнениями, описывающими поведение релаксирующей среды микросдвигами

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = 2\mu(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}^p), \tau = l_1 \dot{\gamma}^p - l_2 \frac{\partial p}{\partial t}, \Pi = l_2 \dot{\gamma}^p - l_3 \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $\dot{\gamma}^p$  – скорость пластической деформации (предполагается аддитивность тензоров упругой и пластической деформации),  $p$  – компонента тензора плотности микросдвигов,  $\rho$  – плотность материала, которая предполагается постоянной,  $\mu$  – модуль сдвига.

Функция  $\Pi$  аппроксимировалась выражением [20],

$$\Pi = -A_1 \tau \exp(-p_a / p) + B_1 (p - p_b), \quad (5)$$

где  $A_1, B_1, p_a, p_b$  – параметры аппроксимации.

Начальные условия принимались в виде

$$\tau(0) = 0, \dot{\gamma}^p(0) = 0, p(0) = 0. \quad (6)$$

В опытах по пробиванию преград обычно определяют зависимость скорости, с которой вылетает пробка  $v_{\text{ВЫХ}}$ , от скорости соударения  $v_{\text{ВХ}}$  и баллистическую скорость  $v_6$  – минимальную скорость пробивания преграды. Путем численного моделирования получены следующие зависимости. Начиная с некоторых скоростей соударения, устанавливается строгая линейная зависимость  $v_{\text{ВЫХ}}$  от  $v_{\text{ВХ}}$ , что совпадает с многочисленными опытами по пробиванию, в частности, с результатами экспериментов, описанными в [23]. При численном определении баллистической скорости  $v_6$  также, начиная с некоторых скоростей соударения, устанавливается линейная зависимость  $v_6$  от толщины преграды, что совпадает с результатами экспериментов, приведенными, в частности, в работе [24].

По мнению авторов [23] и [25], при выбивании "пробки" стабилизация зависимости силы сопротивления ударника от входной скорости (выражающаяся в выходе на асимптоты кривых пробивания) означает существование предельного значения скорости деформирования  $\dot{\gamma}$ , после которого деформационные свойства материала становятся малочувствительными к дальнейшему росту  $\dot{\gamma}$ .

В рамках предлагаемой модели эти явления имеют следующее объяснение. В процессе высокоскоростного деформирования в материале происходит структурно-кинетический переход по параметру плотности микродвигов, связанный не только с их количественным накоплением, но и с резким изменением их ориентационной составляющей (ориентационный переход), что приводит к резкому скачкообразному изменению эффективных характеристик среды, в частности, к резкому падению эффективной вязкости, и, как следствие, к резкому росту скоростей пластических деформаций и релаксации напряжений. В результате сопротивление среды сдвигу падает на 2-3 порядка, выходит на некоторую асимптотическую зависимость и в дальнейшем не меняется.

Эффективную вязкость среды можно представить в виде

$$\sigma'_{ik} = \eta_{\text{э,тм}} e_{ik}^p,$$

где  $\eta_{\text{э,тм}} = l_1 - l_2 \dot{p}_{ik} / e_{ik}^p$ . Откуда ясно, что эффективный коэффициент вязкости при заданной скорости деформации определяется кинетикой роста параметра плотности микродвигов.

Наибольшая скорость роста  $p_{ik}$  достигается при резком изменении ориентационной моды микродвигов (ориентационный переход). Ориентационной является сама природа рассматриваемого деформационного эффекта, обусловленная резкими согласованными поворотами элементов кристаллической структуры в локальных областях [1]. В результате изменяются эффективные макроскопические свойства материала, что представляет собой резкое уменьшение эффективной вязкости в процессе деформирования. Причем, чем больше глубина проникания в область метастабильности (с повышением скорости деформаций), тем более высокие значения  $\dot{p}_{ik}$  достигаются в процессе кинетического перехода. При достижении предельно возможной глубины проникания в область метастабильности значения  $\dot{p}_{ik}$  максимальны и практически не изменяются при увеличении скорости соударения. Этим и объясняется существование асимптотик вязкости при высоких скоростях

деформирования, что экспериментально обнаружено в [26,27]. Другими словами, скорость генерации микродвигов в условиях ориентационного перехода определяет деформационную динамику  $\dot{p}_{ik} \sim \dot{\epsilon}_{ik}^p$ .

Резкий переход к ориентационно-упорядоченному состоянию в ансамбле микродвигов ведет к появлению областей локализованной сдвиговой неустойчивости (полос адиабатического сдвига). Сопротивление сдвигу в этих областях резко падает, и процесс пробивания определяется прежде всего инерционными характеристиками: плотностями и геометрическими размерами ударника и преграды. Исходя из этого можно объяснить слабую зависимость скорости пробивания от материала преграды [24,28] при достижении определенных скоростей соударения.

Установленные автомодельные закономерности позволяют объяснить независимость вязкости конденсированных сред при скоростях деформации  $\dot{\epsilon} \sim 10^4 - 10^6$ , которая была установлена в [29] при измерении затухания возмущений на фронте ударных волн. Удивительный результат этих экспериментов заключается в значениях вязкости, имеющих практически постоянное значение  $\eta \approx 10^4$  пуаз для всех изученных конденсированных сред (алюминий, свинец, вода, ртуть). Универсальность реакций конденсированных сред при указанных скоростях деформирования также может быть объяснена адиабатическим подчинением скорости деформации деформационной кинетике, обусловленной коллективными эффектами ансамблей микродвигов в условиях ориентационного перехода.

С точки зрения данного подхода автомодельными закономерностями ориентационного кинетического перехода в системе микродвигов обусловлена универсальная зависимость скорости деформации от напряжений, имеющая четвертую степень по амплитуде напряжений, установленную в [30-33] для пластического фронта ударных волн.

В рамках рассматриваемой модели было проведено численное моделирование распространения полос неустойчивости пластического сдвига как специфических волн пластической деформации. В разложении для  $\Pi$  был сохранен член, описывающий возможную пространственную неоднородность распределения тензора плотности микродвигов:

$$\Pi = -A(p)\tau \exp(-p_a / p) + B_1(p - p_b) - D_1 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (7)$$

где  $D_1$  – параметр нелокальности.

В данной постановке параметр аппроксимации  $A$  рассматривается как функция от  $p$ :  $A = A_1 \left( \frac{p}{p_*} \right)^4$ , где  $p_*$  – некоторая константа. Данная функция учитывает качественное изменение реакции твердого тела на образование микродвигов в зависимости от дефектности структуры.

Начальные и граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \tau(z,0) = 0, \dot{\gamma}^p(z,0) = 0, p(z,0) = 0, \\ \nabla p(0,t) = 0, \nabla p(h,t) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В результате численного моделирования системы (2)–(4), (7), (8) получено, что ориентационно-кинетический переход по параметру плотности микродвигов распространяется от сечения к сечению по толщине пластины с некоторой скоростью и сопровождается скачкообразным увеличением скорости пластических деформаций, быстрой релаксацией напряжений, резким падением сопротивления сдвигу.

Распространение неустойчивости пластического сдвига вглубь по толщине пластины можно рассматривать как своеобразную пластическую волну, имеющую некоторые свойства уединенной волны и не меняющую конфигурацию фронта. В частности, наблюдается сильная зависимость скорости пластической волны от амплитуды. На рис.1, 2 представлены результаты численного моделирования при скоростях соударения 500 м/с и 1000 м/с.

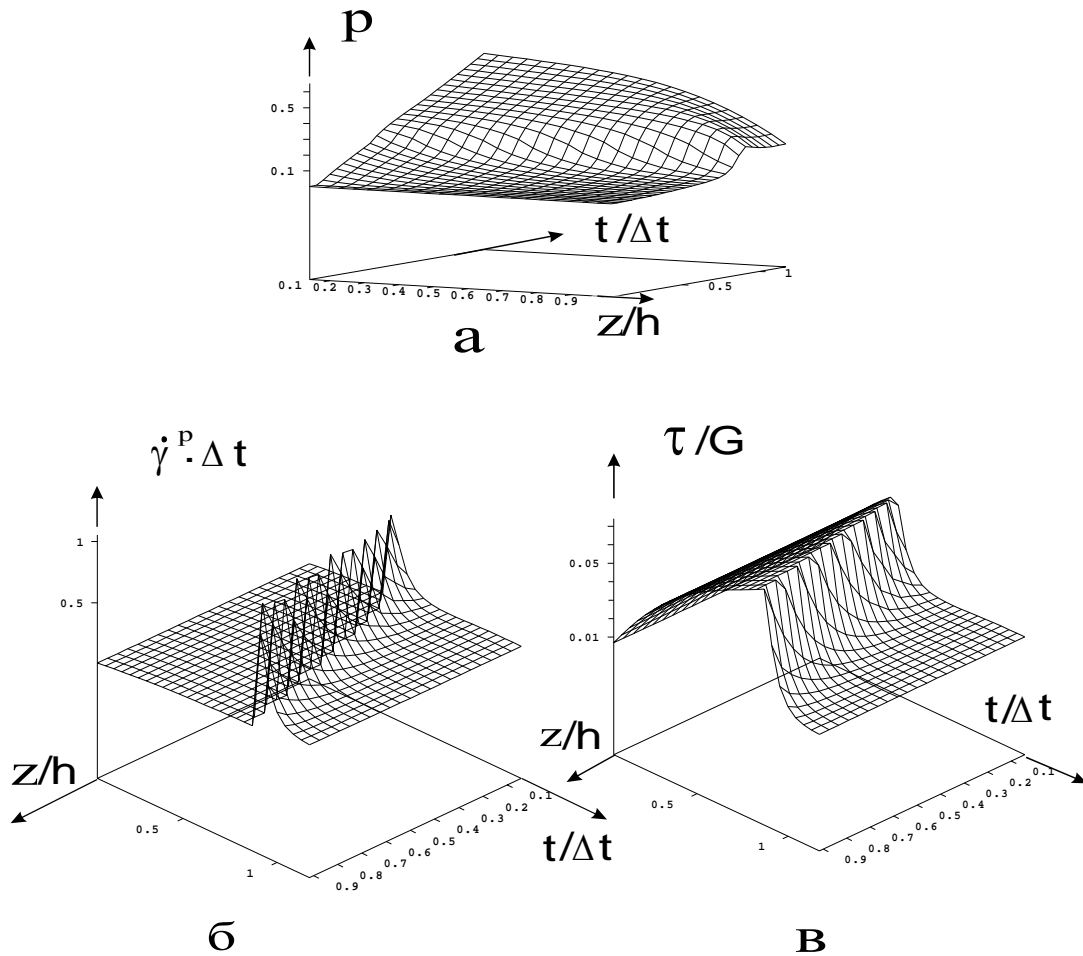


Рис.1. Распространение пластической сдвиговой неустойчивости по толщине пластины при скорости соударения 500 м/с: а) плотность микродвигов  $p$ ; б) скорость сдвиговой пластической деформации  $\dot{\gamma}^P$ ; в) сдвиговое напряжение  $\tau$ ;  $\Delta t = 1 \mu\text{с}$  – характерное время,  $h$  – толщина пластины,  $G$  – модуль сдвига

Таким образом, волны пластической неустойчивости обладают некоторыми признаками уединенных волн. Существенная нелинейность уравнений отражает коллективные эффекты, происходящие в ансамбле микродвигов в условиях кинетического перехода.

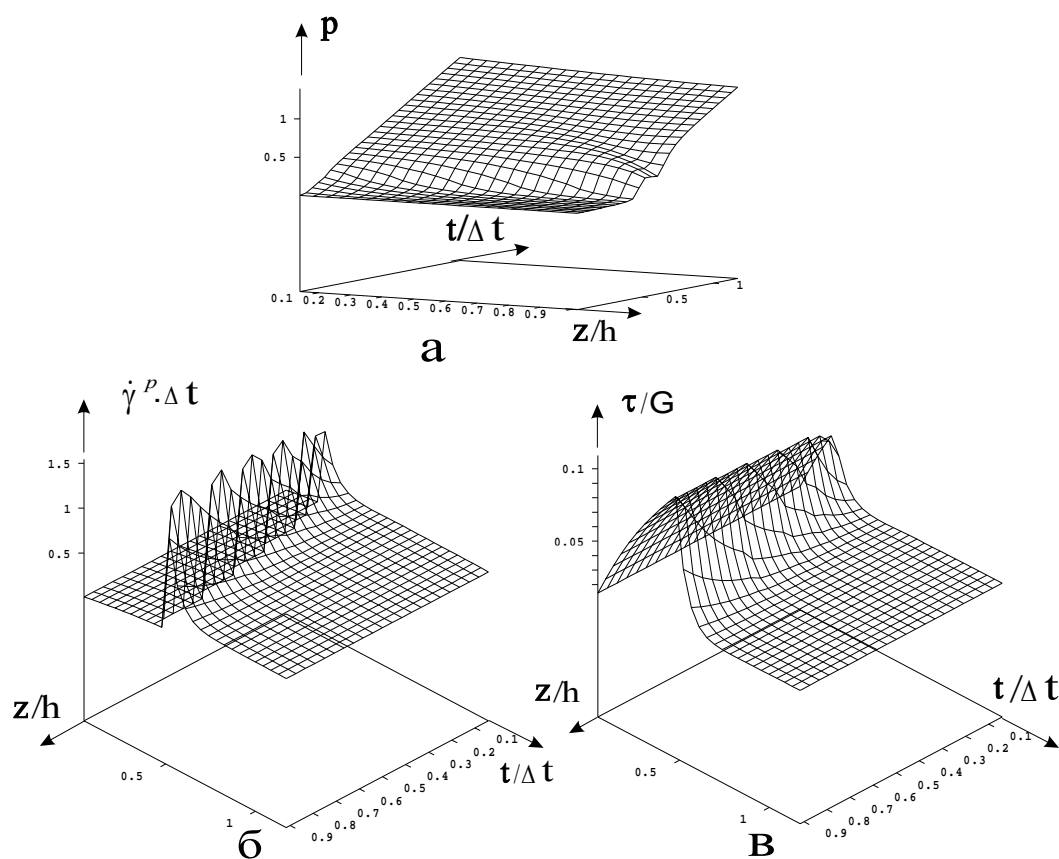


Рис.2. Распространение пластической сдвиговой неустойчивости по толщине пластины при скорости соударения 1000 м/с: а) плотность микросдвигов  $p$ ; б) скорость сдвиговой пластической деформации  $\dot{\gamma}^p$ ; в) сдвиговое напряжение  $\tau$ ;  $\Delta t = 1 \text{ мкс}$  – характерное время,  $h$  – толщина пластины,  $G$  – модуль сдвига

### Библиографический список

1. Meyer L.W., Staskewitsch E., Burblied A. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/ shear loading// *Mechanics of Materials*. – 1994. – №17. – P.175–193.
2. Burns T.J. Does a shear band result from a thermal explosion // *Mechanics of Materials*. – 1994. – №17. – P.261–272.
3. Sia Nemat-Nasser, Yeou-Fong Li, Jon B. Isaacs. Experimental/ computational evolution of flow stress at high strain rates with application to adiabatic shear banding// *Mechanics of Materials*. – 1994. – №17. – P.111–134.
4. Meyers M.A., Subhash G., Kad B.K., Prasad L. Evolution of microstructure and shear-band formation in  $\alpha$ -hcp titanium// *Mechanics of Material*. – 1994. – №17. – P.175–193.
5. Frassengeas C., Molinari A. Instability and localization of plastic flow in shear at high strain rates// *J.Mech.Phys.Solids*. – 1987. – Vol.35. – №2. – P.185–211.
6. Frassengeas C., Molinari A. The time development of eulerian/ lagrangian perturbatuions to simple shear and its applications to shear banding// *J.Mech.Phys.Solids*. – 1992. – Vol.40. – №8. – P.1735–1756.
7. Gilman J.J. Micromechanics of shear banding// *Mechanics of Materials*. – 1994. – №17. – P.83–96.

8. Mgbokwere C.O., Nutt S.R., Duffy J. Shear band formation in 4340 steel: A TEM study// *Mechanics of Materials*. – 1994. – №17. – P.97–100.
9. Yilong Bai, Qing Xue, Letian Shen Characteristics and microstructure in the evolution of shear localization in Ti-6Al-4V alloy// *Mechanics of Materials*. – 1994. – №17. – P.155–164.
10. Grady D.E. Dynamic of adiabatic shear// *Journal de Physique IV, Colloque C3, suppl. au Journal de Physique III. Vol. 1. October 1991*. – P.653–660.
11. Коффи К.С., Армстронг Р.В. Образование областей перегрева при ударном нагружении// *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов*. – М.: *Металлургия*, 1984 – С.67-89.
12. 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.
13. Локализация пластической деформации при скоростном ударном деформировании алюминия и сплава АМ6/ В.В. Астанин, Г.Н. Надеждин, Ю.Н. Петров и др.// *Проблемы прочности*. – 1987. – №3.
14. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластического течения в кристаллах. – Томск: *Изд-во ТГУ*, 1994.
15. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: *Наука*, 1985. – 229 с.
16. Панин В.Е. Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: *Наука*, 1990. – 225 с.
17. *Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. В 2 т./ Под ред. В.Е.Панина*. – Новосибирск: *Наука*, 1995.
18. Наймарк О.Б. О термодинамике деформации и разрушении твердого тела с микротрещинами/ *Институт механики сплошных сред, АН СССР. Свердловск*, 1982. – С.3–34.
19. Naimark, O.V. Kinetic transition in ensembles of microcracks and some nonlinear aspects of fracture. In: *Proceedings IUTAM Symposium on nonlinear analysis of fracture. Kluwer, The Netherlands*, 1996.
20. Беляев В.В., Наймарк О.Б. Кинетические переходы в средах с микротрещинами и разрушение металлов в волнах напряжений // *Журнал прикладной механики и технической физики*. – 1987. – №1. – С.163–171.
21. Наймарк О.Б., М.А. Сокоиков О механизме адиабатического сдвига и высокоскоростное нагружение материалов // *Математическое моделирование систем и процессов*. – 1995. – №3 – С.71–76.
22. Jonas G.H. and Zukas J.A. Mechanics of penetration: analysis and experiments// *Int. J. Eng. Sci.* – 1978. – № 11. – P.879–900.
23. Музыченко В.П., Постнов В.И. О возможности прогнозирования сопротивляемости металлических сплавов пробивающему воздействию // *Журнал прикладной механики и технической физики*. – 1984. – №5. – С.123–125.
24. Милейко С.Т., Кондаков С.Ф., Голофаст Е.Г. Об одном случае пробивания// *Проблемы прочности*. – 1979. – №12. – С.69–71.
25. Милейко В.П., Саркисян О.А. Феноменологическая модель пробивания// *Журнал прикладной механики и технической физики*. – 1981. – №5. – С.140–142.
26. Hauser F.E. Techniques for Measuring Stress-Strain Relations at High Rates// *Exp.Mech.* – 1966. – Vol.6. – № 8. – P.395–402.
27. Степанов Г.В. Коэффициент вязкости металлических материалов при высокоскоростном деформировании в упругопластических волнах нагрузки//

- Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. – Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1978. – С.106–111.
28. Кондаков С.Ф., Саркисян О.А. //Проблемы прочности. – 1980. – № 9.
29. Сахаров А.Д., Зайдель Р.М., Минеев В.Н., Олейник А.Г.// ДАН СССР. – 1965 – Vol.9.– № 12.
30. Минеев В.Н., Савинов Е.Н.// ЖЭТФ – 1965 – Vol. 9. – № 12.
31. Минеев В.Н., Зайдель Р.М.// ЖЭТФ – 1968 – Vol. 27 – № 3.
32. Swegle and D.E.Grady, in Shock Waves in Condensed Matter. – 1985, eds. Y.M.Gupta, Plenum, New York, 1986, p.353.
33. J.W.Swegle and D.E.Grady// J.Appl.Phys. – 1985. – Vol. 58. – P. 692.

Получено 15.06.2003.