

## СТРУКТУРНАЯ ВЯЗКОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Г. Г. Савенков, Ю. И. Мещеряков\*

Федеральное государственное унитарное предприятие НПП «Краснознаменец»  
195043 Санкт-Петербург, sog@hotmail.ru

\*Институт проблем машиноведения РАН, 199004 Санкт-Петербург

Рассмотрены достаточно простые оценки коэффициента динамической вязкости для ряда металлов. Приведены экспериментальные результаты по ударному нагружению плоских образцов из алюминия, меди и сталей. Показано, что коэффициент динамической вязкости зависит от характерного размера структурного уровня пластической деформации, на котором рассматриваются процессы диссипации энергии нагружения. Установлено, что основным уровнем, определяющим вязкость материалов в условиях высокоскоростного нагружения, является мезоскопический с характерным размером  $\approx 10$  мкм.

Ключевые слова: вязкость, высокоскоростное нагружение, мезоскопический уровень, интерферограмма.

Влияние скорости деформации при высокоскоростных процессах упругопластического течения материалов обычно характеризуют коэффициентом динамической вязкости  $\mu$ , который является коэффициентом пропорциональности между приращением скорости деформации и вязкой составляющей сопротивления течения материала.

Имеющиеся в литературе данные о коэффициенте вязкости для различных материалов (особенно это касается материалов с ГЦК-решеткой) отличаются большим разбросом значений даже при одинаковых скоростях деформации (на несколько порядков величины). Например, для алюминия  $\mu = 3 \cdot 10 \div 4 \cdot 10^4$  Па·с [1–3], для меди  $\mu = 1,0$  [4]  $\div 2 \cdot 10$  Па·с [5], для сталей разброс значений достигает двух порядков ( $\mu = 10^3 \div 10^5$  Па·с) [2, 6, 7].

В работе [3] указано, что коэффициент динамической вязкости зависит от масштаба рассматриваемого явления. Действительно, анализ литературных данных показывает, что низкие значения коэффициента динамической вязкости соответствуют процессам, происходящим на микроскопическом уровне с характерным масштабом  $10^{-7} \div 10^{-6}$  м. Характеризующая этот уровень динамическая вязкость связана с такими физическими процессами, как движение точечных дефектов, реакции между отдельными дислокациями, диффузионная пластическая деформация, т. е. процессами, которые не предполагают коллективных движений дефектов структуры материала.

Наоборот, высокие значения коэффициента вязкости, как правило, получены при исследовании процессов, происходящих во всем объеме материала. Для этого уровня характерны коллективные движения элементарных носителей пластической деформации. Его характерный масштаб  $10^{-5} \div 10^{-3}$  м (так называемый макроскопический уровень). Согласно существующим представлениям вязкость жидкостей и твердых тел связана с внутренними диссипативными процессами, обусловленными конечностью скорости движения внутренних частиц [8], и, естественно, макроскопическая вязкость, получаемая из традиционных экспериментов по импульсному нагружению образцов, не может не определяться микроскопическими характеристиками.

Согласно современным представлениям пластическая деформация твердых тел протекает на различных структурных уровнях [9], имеющих свою иерархию, и обладает трансляционно-ротационным характером, при этом трансляция на одном структурном уровне сопровождается поворотом на другом. В последнее время появляются попытки создания и многоуровневых моделей теорий пластичности и разрушения [10]. Совершенно очевидно, что в этом случае необходимо иметь набор коэффициентов динамической вязкости, отвечающих за диссипацию энергии на каждом структурном уровне.

Любой структурный уровень имеет свой характерный размер  $h$  и свою совокупность физических процессов. Первым структурным

уровнем, играющим сколь-нибудь существенную роль в процессах деформации, несомненно следует считать микроскопический уровень с характерными атомными размерами. Это уровень движения точечных и одиночных линейных дефектов. Динамическая вязкость на нем связана с динамическим торможением дислокации [11], а ее численное значение определяется выражением

$$\mu_1 = \alpha \frac{B}{b^2 N_m}, \quad (1)$$

где  $B$  — коэффициент вязкости торможения дислокаций,  $b$  — вектор Бюргера,  $N_m$  — плотность подвижных дислокаций,  $\alpha$  — константа,  $\alpha < 1$  [11]. Рассчитанные по зависимости (1) значения  $\mu_1$  для большинства металлов при  $B = 10^{-3} \div 10^{-2}$  Па·с [11] не превышают 100 Па·с и в основном находятся в диапазоне  $30 \div 50$  Па·с.

Следуя терминологии работы [12], вторым крайним уровнем следует признать макроскопический уровень с характерными размерами  $h_4 = 10^{-5} \div 10^{-3}$  м, на котором вводится понятие «точки» в классической теории упругости и пластичности. Очевидно, что коэффициент динамической вязкости на этом уровне определяется по классическим методам импульсного нагружения образцов [2, 5, 13] и верхний предел значений  $\mu_4$  в соответствии с этими работами равен  $10^5 \div 10^6$  Па·с. Нижний предел коэффициента вязкости на этом уровне определяется соотношением между  $\mu_4$  и шириной ударного фронта [14]:

$$\mu_4 \approx \rho_0 u \lambda D t, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность материала,  $u$  — массовая скорость частиц во фронте ударной волны,  $\lambda$  — коэффициент в законе ударной сжимаемости в виде соотношения  $D(u)$ ,  $D$  — скорость ударной волны,  $t$  — ширина фронта ударной волны во времени. Принимая следующие порядки входящих в соотношение (2) параметров:  $\rho_0 \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $u \approx 10^2 \div 10^3$  м/с,  $\lambda \approx 1$ ,  $D \approx 10^3$  м/с,  $t \approx 10^{-6}$  с, получим  $\mu_4 \approx 10^3 \div 10^4$  Па·с.

Третьим, весьма существенным, является мезоскопический уровень. Для определения коэффициента динамической вязкости на этом уровне можно воспользоваться методами интерферометрии динамически нагружаемого плоского образца с привлечением данных

Параметры мишени, ударника и интерферометра

Материал мишени	Медь марки М2
Толщина мишени	5 мм
Толщина ударника	2 мм
Скорость ударника	145,6 м/с
Продольная скорость звука	$4,7 \cdot 10^3$ м/с
Плотность материала мишени	$8,96 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
Постоянная плеча задержки лазерного дифференциального интерферометра	41 м/с

металлографического анализа испытанных образцов.

В ряде работ (см. [15, 16]) показано, что при динамическом нагружении пластическая деформация осуществляется за счет движения с проскальзыванием относительно друг друга микропотоков частиц среды с характерным разбросом скоростей. Такое распределение микропотоков материала по скоростям есть не что иное как признак турбулизации его пластического течения.

Согласно гидродинамической теории турбулентности (а феноменологические закономерности турбулентного течения в жидкости и твердых телах одинаковы [9]) диссипация энергии внутреннего движения происходит в мелко-масштабных пульсациях, а ее порядок определяется из теории размерности в виде [17]

$$\Delta E \approx (\Delta u)^3 / \Delta h, \quad (3)$$

где  $\Delta h$  — внешний масштаб турбулентности. С другой стороны,

$$\Delta E \approx \mu_3 \dot{\epsilon}^2 / \rho, \quad (4)$$

где  $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации. Приравнявая (3) и (4), получим

$$\mu_3 \approx \rho (\Delta u)^3 / \Delta h \dot{\epsilon}^2. \quad (5)$$

При  $\dot{\epsilon} \approx 10^4 \div 10^5$  с<sup>-1</sup>, как показывают экспериментальные данные,  $\Delta h$  (в данном случае это расстояние между микропотоками, определяемое методами металлографического анализа) не превосходит  $10^{-5}$  м, что является верхним значением характерного размера мезоскопического уровня. Разброс скоростей  $\Delta u$  для металлов определяется с помощью интерферометрического метода на основе измерения контрастности интерференционного сигнала в соответствии с выражением

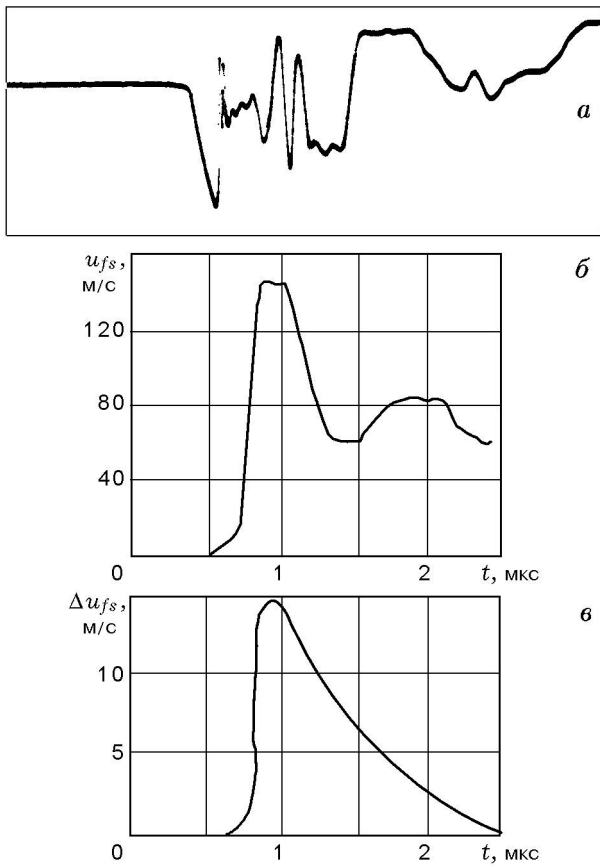


Рис. 1. Интерферограмма (а), временной профиль скорости свободной поверхности (б) и изменение ширины распределения частиц свободной поверхности по скоростям (в), полученные при ударном нагружении мишени из меди М2 со скоростью ударника 146 м/с

$$I = \exp(-\pi^2 \Delta u^2 / 2V_{пл}^2), \quad (6)$$

где  $V_{пл} = 41$  м/с — постоянная плеча задержки интерферометра.

Примером интерферограммы, на которой заметно снижение контрастности интерференционного сигнала, может служить интерферограмма, полученная при ударном нагружении медной мишени. Основные параметры удара, соответствующие данному опыту, и интерферограмма представлены в таблице и на рис. 1 соответственно. Из рисунка видно, что к середине пластического фронта контрастность интерференционного сигнала составила  $I = 0,15$ , что согласно выражению (6) соответствует ширине распределения частиц по скоростям  $\Delta u_{fs} = 15$  м/с, т. е. 10 % от средней скорости. Расчеты коэффициента динамической вязкости

по формуле (5) дают значение 18,8 Па·с.

Разброс скоростей для алюминия и алюминиевых сплавов, определенный по той же методике, составляет  $20 \div 50$  м/с, а для стали —  $50 \div 150$  м/с. Этим значениям разброса скоростей микропотоков соответствуют значения  $\mu_3 = 2 \cdot 10^2 \div 10^5$  Па·с и  $\mu_3 = 10^4 \div 10^5$  Па·с.

Нижний диапазон значений коэффициента вязкости на этом структурном уровне можно определить из выражения

$$\mu_3 = \rho_0 \Delta u \Delta h. \quad (7)$$

В этом случае для алюминиевых сплавов  $\mu_3 = 5 \cdot 10^{-1} \div 1,3$  Па·с, для сталей —  $\mu_3 = 4 \div 12$  Па·с.

Наряду с движением материала в волнах нагрузки в виде микропотоков с некоторым разбросом скоростей можно наблюдать движение отдельных зерен как целого. Такая ситуация продемонстрирована в работе [15] на примере алюминия А-998. Поворот зерен как целого наблюдается также в сплаве медь — марганец и в стали 12Х18Н10Т. В качестве примера на рис. 2 приведены интерферограммы импульса скорости свободной поверхности мишени из сплава медь — марганец. В этих опытах одновременно с интерферограммой с помощью дополнительного фоторегистратора фиксировалось изменение интенсивности отраженного от мишени лазерного излучения (рис. 2, б). На первой интерферограмме, полученной при скорости нагружения 138 м/с, интерференционный сигнал записан полностью, так что число биений соответствует скорости нагружения. На второй интерферограмме, полученной при ударном нагружении аналогичной мишени со скоростью 190 м/с, наблюдается срыв биений интерференционного сигнала уже на первом биении пластического фронта. Этот срыв по времени совпадает с резким уменьшением интенсивности отраженного от мишени излучения, что свидетельствует о повороте зерна, на которое падает зондирующий луч интерферометра. Представленные на рис. 3 интерферограммы, полученные при различных скоростях нагружения образцов из стали 12Х18Н10Т, свидетельствует о том, что поворот зерна осуществляется тем быстрее, чем выше скорость нагружения. Используя данные о скорости поворота зерен (по скорости ухода лазерного луча из апертуры интерферометра), можно определить динамическую вязкость, связанную с этим процессом.

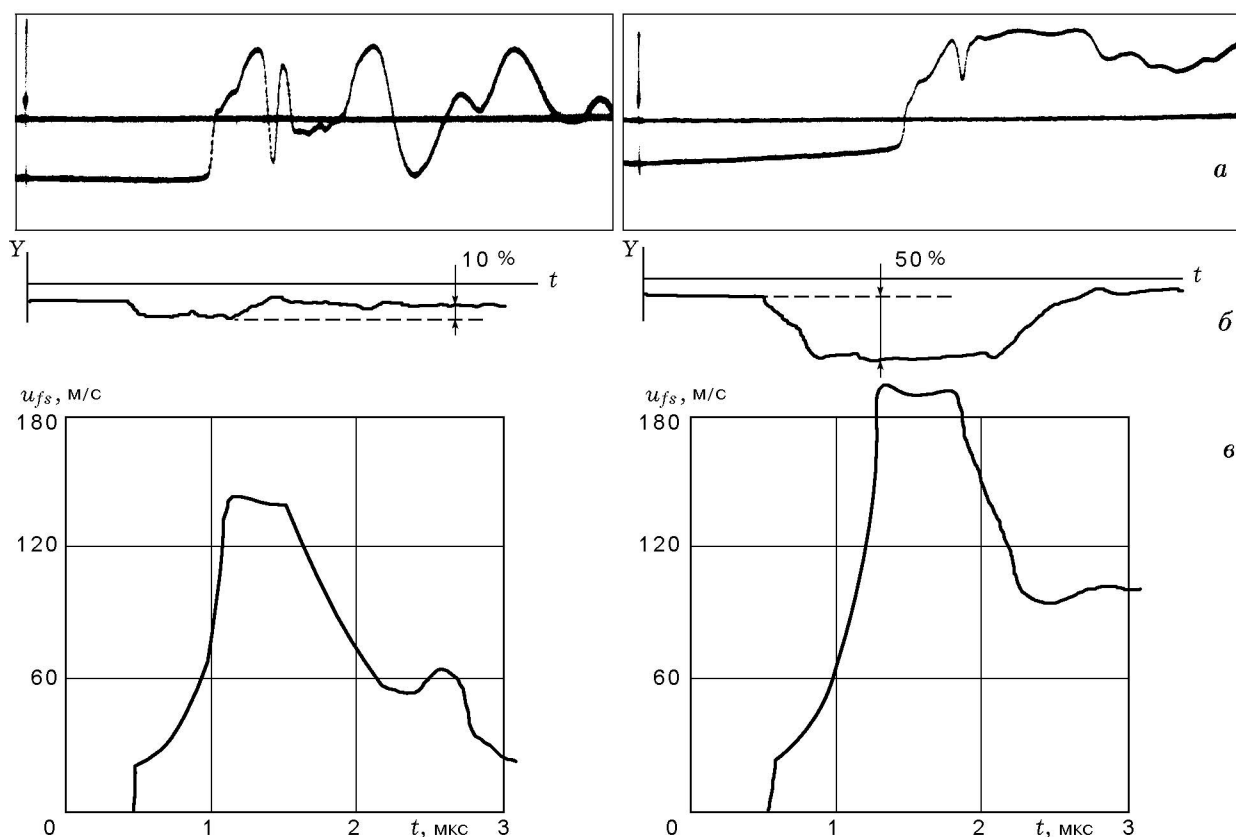


Рис. 2. Интерферограммы, полученные при ударном нагружении мишени из сплава медь — марганец со скоростью ударника 138 м/с (а, слева) и 190 м/с (а, справа). Истории изменения интенсивности отраженного от мишени лазерного излучения (б) и расшифрованные импульсы скорости свободной поверхности (в)

В некоторых материалах движение зерен в процессе прохождения ударной волны носит не вращательный характер, а колебательный. Примером такого поведения является представленная на рис. 4 интерферограмма скорости свободной поверхности мишени из стали Ст. 45, нагруженной со скоростью 208 м/с. Этот процесс также связан со структурным уровнем с характерным масштабом, равным диаметру зерна.

В двух последних случаях динамическое деформирование материала осуществляется за счет проскальзывания или вращения по границам зерен. Поэтому коэффициент динамической вязкости должен вычисляться с учетом особенностей такого движения зерен.

При колебательном движении зерен коэффициент вязкости можно определить в рамках модели вязкоупругого тела Максвелла, приравняв энергию колебательного движения осциллятора с трением

$$E_1 = E_0 \exp(-2\lambda_1 t)$$

запасенной упругой энергии

$$E_2 = E_0 \exp(-2Gt/\mu_2).$$

В результате имеем

$$\mu_2 = G/\lambda_1. \quad (8)$$

Здесь  $G$  — модуль сдвига,  $\lambda_1$  — коэффициент затухания, определяемый на основе данных интерферометрических измерений по зависимости

$$\lambda_1 = (\ln \delta)/T, \quad (9)$$

где  $\delta$  — логарифмический декремент затухания,  $T$  — период колебаний.

Подставляя (9) в (8), получим

$$\mu_2 = GT/\ln \delta. \quad (10)$$

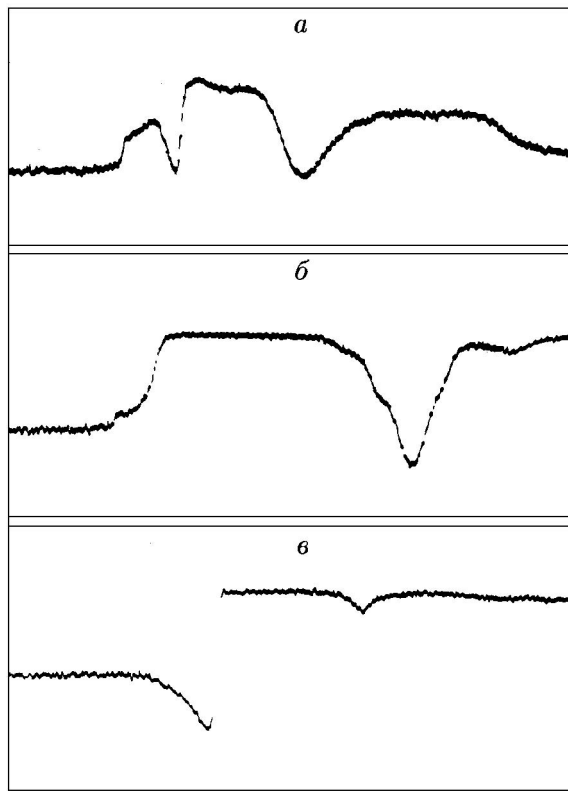


Рис. 3. Интерферограммы скорости свободной поверхности, полученные при ударном нагружении мишени из стали 12Х18Н10Т со скоростями ударника 229 (а), 240 (б) и 298 м/с (в): временной масштаб 500 нс/см

Значения  $\mu_2$ , полученные расчетом по формуле (8) для алюминиевых сплавов и сталей, лежат в диапазоне  $10^2 \div 10^3$  Па·с.

Рассмотрим случай вращательного движения зерен для вязкопластичного материала. Приравнявая энергию вращения сферического зерна

$$E_3 = 0,5J\omega^2 = 0,05\omega^2 d^2$$

запасенной энергии

$$E_4 = \sigma^2/2E\rho = (\sigma_0 + \mu_2\dot{\epsilon})^2/2E\rho,$$

получим значение

$$\mu_2 = ((0,1E\rho)^{0,5}\omega d - \sigma_0)/\dot{\epsilon}.$$

Здесь  $J$  — момент инерции зерна,  $\omega$  — угловая скорость вращения,  $d$  — средний диаметр зерна,  $E$  — модуль Юнга,  $\sigma_0$  — предел текучести материала. Рассчитанные по этой зависимости значения  $\mu_2$  для материалов с ГЦК-решеткой

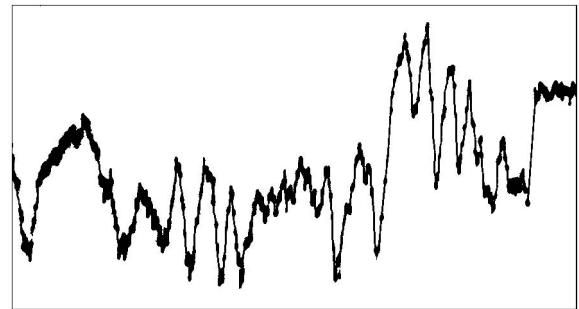


Рис. 4. Интерферограмма скорости свободной поверхности мишени из стали марки Ст. 45, демонстрирующая наличие осцилляции зерен на фоне свободной поверхности мишени

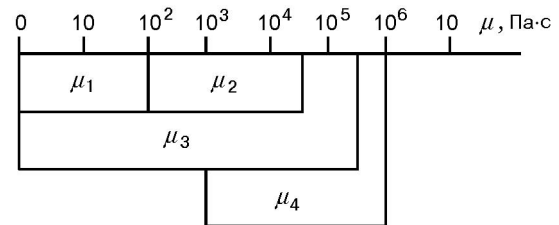


Рис. 5. Пределы изменения вязкости в сталях на различных структурных уровнях

дали следующие результаты:  $\mu_2 = 6 \cdot 10^3$  Па·с для стали 12Х18Н10Т,  $\mu_2 = 1,2 \cdot 10^3$  Па·с для меди марки М2.

Все полученные результаты представлены в виде диаграммы на рис. 5. Видно, что основным структурным уровнем является мезоскопический, на котором происходит основная диссипация энергии внутреннего движения. Это еще раз подтверждает, что в большинстве случаев макроскопическая пластическая деформация определяется в основном процессами, протекающими на мезоскопическом уровне, и контролируется этим уровнем [11, 18]. Кроме того, из диаграммы видно, что диссипация энергии на каждом структурном уровне (за исключением микроскопического) определяется суммой диссипации энергии на своем и предыдущих уровнях.

Итак, становятся понятными те кажущиеся противоречивые результаты теоретических и экспериментальных оценок коэффициента динамической вязкости, существующие в литературе. На самом деле, эти результаты получены в ситуациях, когда определяющие физические процессы относятся к разным струк-

турным уровням. Например, значения коэффициента динамической вязкости для меди, приводимые в настоящей работе, относятся к зеренному уровню, значения в работе [5] — к макроуровню, в [1, 17] — к мезоскопическому уровню, а в работе [4] — к микроуровню. Аналогичная ситуация со значениями коэффициента динамической вязкости алюминия, приводимыми в работах [1, 2, 5, 19, 20].

Таким образом, представленные результаты и систематизация полученных ранее данных по динамической вязкости металлов в условиях высокоскоростной деформации однозначно свидетельствуют о ее структурной природе и имеющейся иерархии значений коэффициентов вязкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев В. К. О расширении пор в пластических материалах при отколе // ПМТФ. 1983. № 6. С. 159–165.
2. Степанов Г. В. Влияние скорости деформации на характеристики упругопластического деформирования металлических материалов // ПМТФ. 1982. № 1. С. 150–156.
3. Огородников В. А., Садовый А. А., Тюнькин Е. С. и др. О вязкости алюминия и свинца в ударно-волновых экспериментах // ПМТФ. 1995. № 1. С. 5–11.
4. Johnson J. N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J. Appl. Phys. 1981. V. 52, N 4. P. 2812–2825.
5. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
6. Сериков С. В. Оценка предельной деформации при разрушении металлических труб под воздействием интенсивных нагрузок // ПМТФ. 1987. № 1. С. 155–163.
7. Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Иванов А. Г. Прочность и вязкость металлов в широком диапазоне изменения скоростей деформации // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 3. С. 134–140.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Наука, 1987.
9. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985.
10. Лихачев В. А., Волков А. Е., Шудегов В. Е. Континуальная теория дефектов: структурно-аналитическая механика материалов. Л.: ЛГУ, 1987.
11. Альшиц В. И., Индебом В. Л. Динамическое торможение дислокаций // Успехи физ. наук. 1975. Т. 115, вып. 1. С. 48–84.
12. Владимиров В. И., Иванов В. Н., Приемский Н. Д. Мезоскопический уровень пластической деформации // Физика прочности и пластичности. Л.: Наука, 1986. С. 69–80.
13. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под воздействием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1979.
14. Альтшулер Л. В., Доронин Г. С., Ким Г. Х. Вязкость ударно-сжатых жидкостей // ПМТФ. 1986. № 6. С. 110–118.
15. Диваков А. К., Коханчик Л. С., Мещеряков Ю. И., Мышляев М. М. К микромеханике динамического деформирования и разрушения // ПМТФ. 1987. № 3. С. 135–144.
16. Мещеряков Ю. И., Диваков А. К., Кудряшов В. Г. О динамической прочности при отколе и пробое // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 2. С. 126–134.
17. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
18. Панин В. Е. Физическая мезомеханика материалов // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1999. № 5. С. 88–108.
19. Курран Д. Р., Симен Л., Шокки Д. А. Микроструктура и динамика разрушения // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Металлургия, 1984. С. 387–412.
20. Судьенков Ю. В., Филиппов Н. М., Недбай Л. И. Эффективная вязкость алюминия при высоких скоростях деформации // Журн. техн. физики. 1981. Т. 51, № 10. С. 2128–2182.

Поступила в редакцию 15/V 2001 г.