

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ (ОТКОЛЕ) ХРУПКИХ И ВЯЗКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, В. И. Лучинин,
А. А. Хохлов, А. П. Цой

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты экспериментального исследования откольной прочности образцов из свинца (С1) и металлокерамики (Al + 20% SiC) как представителей более вязких и хрупких материалов по сравнению с исследованными ранее. Размеры образцов менялись 4–5 раз. Установлено, что при разрушении исследованных материалов в условиях высокоскоростной одномерной деформации наблюдаются заметные масштабные эффекты, которые имеют энергетическую природу.

В [1, 2] исследовалась природа масштабных эффектов при динамическом разрушении (отколе) ряда конструкционных металлов и сплавов, таких как медь (М1), нержавеющая сталь (12Х18Н10Т), титановый сплав (ПТ-3В). Первый из них в обычных условиях нагружения (в квазистатике) разрушается более вязким, а последний — более хрупким образом. Для всех исследованных материалов выявлена общая закономерность: при разрушении в условиях одномерной высокоскоростной деформации ($\dot{\epsilon} \approx 10^3 \div 10^5 \text{ с}^{-1}$) имеют место сильные масштабные эффекты энергетической природы. Образцы большего размера (размеры изменялись в 5–10 раз) разрушаются при меньших значениях максимальных растягивающих напряжений, но при больших запасах упругой энергии в образцах перед разрушением, что проявляется в большей степени разрушения образца в окрестности плоскости откола. При разрушении с изменением масштаба системы аналогично ведут себя, например, оболочечные конструкции при импульсном нагружении [3].

В [1–3] было установлено, что удельная (на единицу поверхности) работа разрушения λ , определенная в экспериментах по ударно-волновому нагружению геометрически подобных образцов, не является константой, а зависит от условий нагружения, уменьшаясь, например, с сокращением времени нагружения t . В частности, для материалов исследованных в [1, 2] при нормальной температуре (273 К), зависимость имеет вид $\lambda = \lambda_0(t/t_0)^m$. С учетом

этого зависимость максимальных растягивающих напряжений при разрушении от времени их действия более слабая, чем следует из непосредственного сопоставления запаса упругой энергии в образце с работой разрушения образца на части, и имеет (с учетом $\Delta = ct$) вид

$$\sigma_p^2 = \frac{2\gamma_0 E}{ct_0^m} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} t^{m-1},$$

где $2\gamma_0$ — энергия образования свободной поверхности; E, ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона; c — скорость звука в материале; Δ — толщина образца. Величина показателя степени может быть найдена из опытов по разрушению геометрически подобных образцов:

$$m = 1 - 2 \left(\lg \frac{\sigma_i}{\sigma_j} / \lg \frac{\Delta_j}{\Delta_i} \right).$$

К аналогичным выводам пришли в [4] при исследовании термомеханического разрушения (откольного разделения на части) плоских образцов из титана (ВТ1-0), латуни (Л62, Л63), бронзы (БрБ2, БрБ2М) и молибдена (М4-1) толщиной $\Delta = 0,01 \div 1$ мм, подвергнутых удару импульсом рентгеновского излучения ядерного взрыва субмикросекундной длительности ($t \approx 10^{-8}$ с). Авторы [4] установили, что только при учете зависимости $\lambda = \lambda(t)$, которая принята ими в виде $\lambda = \alpha t(\beta + \lg \theta)^2$, где $\theta = t[c]/c\Delta$, α, β — константы, экспериментальные данные по термомеханическому откольному разрушению исследуемых материалов согласуются с результатами расчетов с использованием энергетического критерия разрушения.

Таблица 1

Материал	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	a	b	ν	E , ГПа	K_d , МПа · м ^{1/2}	$\sigma_{0,2}$, МПа
C1	11,31	2,03	2,03	1,52	0,45	15	—	14
Al + 20 % SiC	2,76	5,68	5,54	1,36	0,308	102,6	10,4	260

В данной работе, продолжающей исследования [1, 2], изучается влияние масштабного фактора на высокоскоростное разрушение образцов из свинца C1 и алюминиевого композита Al + 20 % SiC, являющихся представителями более вязких и хрупких материалов по отношению к исследованным ранее. Алюминиевый композит — сплав A359 (фирма DURAL, Сан-Диего) — был поставлен Лос-Аламосской национальной лабораторией (США). Он представлял собой алюминиевый сплав A356, модифицированный большим содержанием Si. Композит в состоянии поставки и после термообработки имеет структуру алюминиевой основы, состоящей из дендритов твердого раствора алюминия с кремнием (максимальное содержание кремния 1,65 % согласно диаграмме состояния Al — Si) и эвтектики алюминия с кремнием (содержание кремния 12,7 % согласно диаграмме состояния Al — Si) с вкраплением частиц SiC. Некоторые физико-механические характеристики исследуемых материалов при $T = 293$ К приведены в табл. 1. Здесь ρ_0 — плотность материала; K_d — динамическая трещиностойкость при относительной скорости нагружения $\sim 10^4$ с⁻¹; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести при скорости деформации $\dot{\epsilon} = 240 \div 340$ с⁻¹; a , b — коэффициенты, связывающие волновую и массовую скорости: $D = a + bu$.

Эксперименты с плоским соударением, постановка которых описана в [1], проводили на установке БУТ-76. Образцы из свинца и металлокерамики в форме дисков диаметром 50 мм запрессовывали в обойму из меди или алюминия соответственно с наружным диаметром 90 мм. Такие мишени при испытании образцов из свинца нагружались ударником из меди, а в случае образцов из металлокерамики — ударниками из алюминия диаметром 75 мм и толщиной $\Delta_{уд}$, равной половине толщины мишени Δ_m . Размеры мишени и ударника выбирали из условия обеспечения одномерности деформации материала образцов: для свинца $\Delta_{уд}/\Delta_m = 1,0/2,0$; $2,5/5,0$ и $5,0/10,0$ мм, для металлокерамики — $1,25/2,5$; $2,5/5,0$ и $5,0/10,0$ мм. В не-

которых опытах с тонкими мишенями из свинца толщина ударника увеличивалась до 1,5 мм при сохранении толщины образца 2 мм. Это связано с выяснением возможного влияния толщины тонкого ударника на его предполагаемый прогиб или на увеличение разновременности соударения и размытие профиля скорости свободной поверхности образца $W(t)$.

Для каждой пары «ударник — мишень» проводили 5–6 опытов, в которых скорость ударника изменялась таким образом, что реализовывались следующие условия нагружения образцов в мишени: *A* — отсутствие зародышей разрушения, наблюдаемых в микрошлифах продольного сечения образцов при увеличении в 200 раз; *B* — появление в плоскости откола отдельных зародышей разрушения в виде микропор и микротрещин; *C* — слияние отдельных зародышей разрушения в магистральную трещину; *D* — полное разделение образца на части.

В каждом опыте с помощью емкостного датчика с охранным кольцом вели непрерывную регистрацию скорости свободной поверхности образца. Дополнительно измеряли скорость подлета ударника W_0 к мишени с точностью 0,5 %, что позволяло проводить нормировку зависимостей $W(t)$, получаемых емкостными датчиками с меньшей точностью. Значения максимальных растягивающих напряжений при отколе определяли с использованием профиля $W(t)$ по формуле

$$\sigma_p = 0,5\rho_0c_0\Delta W,$$

где ΔW — разница скоростей в первом максимуме (W_1) и первом минимуме (W_2) зависимости $W(t)$ с учетом упругопластической поправки [5]. Результаты опытов приведены в табл. 2. Здесь $\sigma_0 = 0,5\rho_0c_0W_0$; $\dot{\epsilon} = (\partial W/\partial t)(1/2c_0)$, где $\partial W/\partial t$ — наклон зависимости $W(t)$ перед первым минимумом; δ — толщина откола, Π — степень поврежденности образцов.

На рис. 1, *a, б* приведены фотографии микрошлифов продольного сечения образцов из металлокерамики и свинца толщиной 10 мм после их нагружения (случай *C*). Качественная

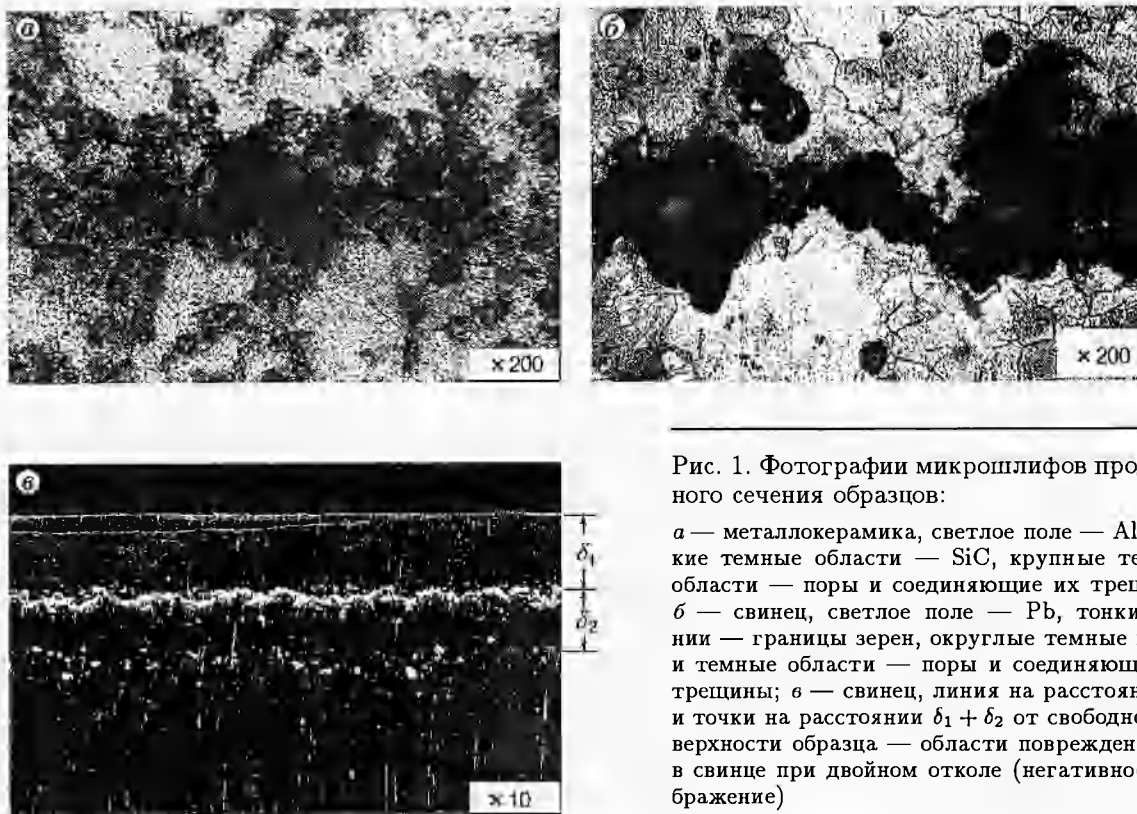


Рис. 1. Фотографии микрошлифов продольного сечения образцов:

a — металлокерамика, светлое поле — Al, мелкие темные области — SiC, крупные темные области — поры и соединяющие их трещины; *b* — свинец, светлое поле — Pb, тонкие линии — границы зерен, округлые темные пятна и темные области — поры и соединяющие их трещины; *в* — свинец, линия на расстоянии δ_1 и точки на расстоянии $\delta_1 + \delta_2$ от свободной поверхности образца — области поврежденности в свинце при двойном отколе (негативное изображение)

картина разрушения образцов меньшего размера такая же. С уменьшением толщины образцов уменьшается зона разрушения материала (h), примыкающая к плоскости откола. Так, для образцов из свинца толщиной 2, 5, 10 мм и металлокерамики толщиной 2,5, 5, 10 мм $h = 0,6; 1,5; 3,0$ и $0,4; 0,7; 1,5$ мм соответственно. Для металлокерамики особенностей разрушения по сравнению, например, с титановым сплавом ПТ-3В [2] не наблюдается. Очаги разрушения представляют собой комбинацию микротрещин и микропор, формирующихся вблизи плоскости откола. Для свинца имеются особенности, связанные с появлением второго откола (см. рис. 1, *в*). Толщины первого (δ_1) и второго (δ_2) отколов близки и составляют $\approx \Delta_M/4$, а толщина оставшейся части образца равна $\approx \Delta_M/2$. Очаги разрушения формируются в виде пор в окрестности плоскости откола. Причем если степень разрушения материала в плоскости первого откола соответствует условиям *C* или *D*, то в плоскости второго откола она, как правило, соответствует *B* или *C*.

На рис. 2 приведены профили $W(t)$, полученные в опытах с образцами из свинца и металлокерамики при степени их поврежден-

ности, соответствующей случаю *C*. Профили $W(t)$, полученные в опытах при степени поврежденности образца *D*, практически не отличаются от приведенных на рис. 2, а при степенях поврежденности *A, B* имеют особенности, связанные с повторением формы импульса сжатия в образце или с нерегулярностью его формы [1]. Следует отметить, что для образцов из свинца, в отличие от образцов из металлокерамики, независимо от их толщины наблюдается затянутый процесс торможения откольной пластины. Это не противоречит полученным ранее результатам для вязких и хрупких (в обычном смысле) материалов [1, 2].

Из табл. 2 следует, что при изменении толщины образцов из свинца и металлокерамики от 10 до 2 и 2,5 мм соответственно значения σ_p , опененные по профилю $W(t)$, заметно увеличиваются, чего не наблюдалось ранее [1, 2]. Этому способствовало принятие специальных мер по уменьшению влияния возможного прогиба тонких ударников, в частности увеличение их толщины, уменьшение диаметра емкостного датчика с 30 до 20 мм и более глубокое вакуумирование ствола. В связи с этим данные по величине σ_p для тонких образцов ($\Delta_M = 0,75 \div 2$ мм),

Таблица 2

Материал	$\Delta_{уд}$, мм	Δ_m , мм	Номер опыта	W_0 , м/с	W_1 , м/с	W_2 , м/с	$\partial W/\partial t$, 10^6 м/с ²	σ_0 , ГПа	σ_p , ГПа	$\dot{\epsilon}$, с ⁻¹	δ , мм	λ , Дж/см ²	П
С1	5	10	1	22,7	25,7	—	—	0,32	—	—	—	0,47	А
			2	30,6	33,3	—	—	0,43	—	—	2,6	0,85	В
			3*	49,0	63,3	41,3	40	0,70	0,25	0,98	1,8	—	С
			4	65,5	70,0	—	30	0,97	0,24	0,74	2,5	—	Д
			5	78,4	99,3	74,6	30	1,08	0,28	0,74	2,6	—	Д
			6	78,7	99,4	49,0	38	1,09	0,27	0,95	2,6	—	Д
	2,5	5	7	30,5	33,4	—	—	0,43	—	—	—	0,39	А
			8	38,6	48,0	—	—	0,54	—	—	1,1	0,56	В
			9	57,1	67,4	31,8	46	0,79	0,41	1,1	1,2	—	С
			10	81,3	110,5	80,0	30	1,13	0,35	0,7	1,2	—	С
			11	90,6	123,0	92,0	44	1,26	0,36	1,1	1,1	—	Д
	1	2	12	38,5	44,5	—	—	0,54	—	—	—	0,26	А
			13	43,6	47,8	—	—	0,61	—	—	0,5	0,33	В
			14	66,5	—	—	—	0,92	—	—	0,5	—	С
			15	98,8	122,0	42,0	260	1,37	0,92	6,5	0,5	—	С
			16**	103,8	133,0	60,0	250	1,47	0,84	6,2	0,7	—	Д
Al+ 20% SiC	5	10	17	103,0	100,0	—	—	0,81	—	—	—	2,3	А
			18	114,8	108,9	41,8	80	0,90	0,58	0,9	6,0	2,9	В
			19	121,3	104,5	54,5	60	0,97	0,43	0,8	6,0	—	В
			20	166,9	130,8	54,9	105	1,32	0,60	0,9	6,0	—	С
			21	172,9	148,0	77,0	100	1,36	0,65	0,9	6,0	—	Д
			22	207,0	200,0	130,0	105	1,63	0,64	0,9	6,0	—	Д
	2,5	5	23	130,1	115,0	—	—	1,03	—	—	—	1,9	А
			24	156,7	129,9	65,5	150	1,24	0,56	1,4	3,0	2,7	В
			25	163,2	133,0	74,2	200	1,29	0,53	1,4	3,0	—	В
			26	173,9	157,0	94,3	160	1,31	0,53	1,4	3,0	—	В
			27	193,2	167,0	102,0	150	1,52	0,58	1,2	3,0	—	В
			28	208,0	180,7	123,5	160	1,64	0,52	1,4	3,0	—	С
			29	238,6	224,8	155,4	158	1,89	0,62	1,4	3,0	—	Д
	1,25	2,5	30	174,0	160,0	—	—	1,37	—	—	—	1,6	А
31			208,7	185,0	—	—	1,64	—	—	1,5	2,4	В	
32			271,8	265,0	150,0	650	1,71	1,02	5,7	1,5	—	С	
33			293,8	285,4	154,4	400	2,31	1,10	3,5	1,5	—	С	
34			378,5	447,9	241,5	600	2,97	1,73	5,2	1,5	—	Д	

Примечания. * ударник из стали, ** $\Delta_{уд} = 1,5$ мм.

Таблица 3

$W_0, \text{ м/с}$	Pb при $\Delta, \text{ мм}$			$W_0, \text{ м/с}$	Cu при $\Delta, \text{ мм}$					$W_0, \text{ м/с}$	Fe при $\Delta, \text{ мм}$			$W_0, \text{ м/с}$	Ti при $\Delta, \text{ мм}$			$W_0, \text{ м/с}$	Al + 20% SiC при $\Delta, \text{ мм}$		
	1-2	2,5-5	5-10		0,75-1,5	1,25-2,5	2,5-5	5-10	7,5-15		1-2	2,5-5	5-10		1-2	2,5-5	5-10		1,25-2,5	2,5-5	5-10
150				190	D					460	D			560	C			380	D		
140				180	C					440				540		D		360			
130				170						420				520				340			
120				160		D	D			400				500	B			320			
110				150						380				480	A			300			
100	D			140	B	C	C	D		360	C			460				280			
90		D		130	A	B	B	C	D	340	B	D		440		C	D	260	C		
80				120						320				420				240		D	
70	C		D	110			B			300			D	400		C		220			
60		C		100		A				280	A	C		380				200	B	C	D
50				90						260				360				180	A		
40	B	B		80						240				340		B		160			C
30	A		B	70			A	B	C	220		B	C	320				140		B	C
20		A		60				A		200		A		300		A		120		A	B
10			A	50					A	180			A	280			A	100			A
$h, \text{ мм}$	0,6	1,5	3,0		0,1	0,3	0,6	0,8	1,0		0,2	0,6	1,3		0,3	0,5	1,2		0,4	0,7	1,5
$\lambda, \text{ Дж/см}^2$	0,3	0,6	0,9		2,0	3,1	4,8	5,1	7,0		13,9	16,7	24,5		30	32	58		2,4	2,7	2,9
m	0,54 ± 0,08				0,60 ± 0,05						0,69 ± 0,10				0,72 ± 0,12				0,60 ± 0,08		

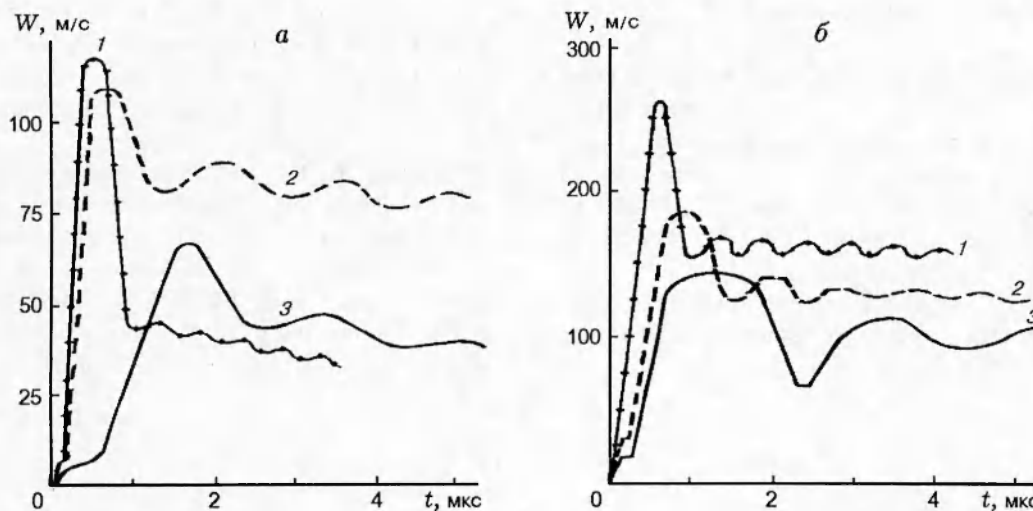


Рис. 2. Профили $W(t)$ для образцов из свинца (а) и металлокерамики (б):
 $\Delta_m = 2$ (1), 5 (2), 10 мм (3)

оцененные в [1, 2] по профилю $W(t)$, нуждаются в уточнении.

Как видно из табл. 2, скорости ударников для любого критического события ($A - D$) заметно возрастают с уменьшением масштаба системы «ударник — мишень», свидетельствуя о существовании масштабных эффектов. Аналогичные закономерности наблюдались в [1, 2]. Следуя [6], представим результаты, полученные в данной работе и в [1, 2], в виде таблицы-диаграммы (табл. 3). Здесь для каждого материала и каждой пары «ударник — мишень» отмечены уровни скоростей ударников, при которых реализуются принятые выше условия нагружения $A - D$, приводящие к различной степени поврежденности. Здесь же приведены значения запаса упругой энергии, при которых начинается процесс разрушения (случай B), и ширины зоны материала, вовлеченного в разрушение. Из табл. 3 следует, что независимо от исследуемых материалов, например для вязких свинца, меди и стали или хрупких титанового сплава и металлокерамики, наблюдаются одни и те же закономерности. Скорость ударника для любой выделенной степени поврежденности образцов заметно возрастает с уменьшением масштаба системы. Причем темп роста скорости увеличивается по мере возрастания хрупкости материала. Почти для всех материалов нетрудно выделить некоторые характерные значения скорости ударников, при которых с увеличением масштаба системы степень поврежденности материала в плоскости отко-

ла может возрастать от полного отсутствия зародышей разрушения до полного разделения образца на части. Запас упругой энергии в образцах при условиях нагружения, характеризующихся отсутствием разрушения (случай A) или появлением зародышей разрушения (случай B), возрастает по мере увеличения масштаба системы. При этом заметно увеличивается ширина зоны материала, вовлеченного в процесс откольного разрушения. Всё это свидетельствует о том, что при разрушении материалов в условиях высокоскоростной одномерной деформации имеют место сильные масштабные эффекты энергетической природы. Удельная (на единицу поверхности) энергия разрушения является возрастающей функцией времени. Из опытов с образцами различной толщины, а следовательно, при различных значениях W_0 и σ_p (с учетом соотношения $\Delta = ct$), объединенных по признаку одинаковой степени поврежденности материала, установлены показатели степени m в определяющей зависимости. Оценки дают средние значения этих показателей, приведенные в табл. 3.

Работа частично выполнена по контракту с Лос-Аламосской национальной лабораторией (США) (№ 0002P0004-95).

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. О природе масштабного эффекта при высокоскоростном разрушении (отко-

- ле) // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 6. С. 88–93.
2. **Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др.** Влияние масштабного и технологического факторов и предварительной деформации на высокоскоростное разрушение (откол) титанового сплава ПТ-ЗВ и стали 12Х18Н10Т // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 130–139.
 3. **Иванов А. Г.** Феноменология разрушения и откол // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 97–104.
 4. **Молитвин А. М., Борин И. П., Босамыкин В. С.** О величине удельной энергии разрушения некоторых материалов и сплавов при тепловом ударе // Проблемы прочности. 1996. № 6. С. 27–32.
 5. **Степанов Г. В.** Откольное разрушение металлов плоскими упругопластическими волнами // Проблемы прочности. 1976. № 8. С. 66–69.
 6. **Ogorodnikov V. A., Ivanov A. G.** On the nature of scale effect (SE) in high-rate fracturing // Shock Compression of Condensed Matter-1995. Seattle, Washington, August 13–18, 1995.

*Поступила в редакцию 6/1 1998 г.,
в окончательном варианте — 10/III 1998 г.*
