

УДК 620.178.7

**ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ФАКТОРОВ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ (ОТКОЛ)
ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТ-3В И СТАЛИ 12Х18Н10Т**

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

*ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Саров*

Представлены результаты экспериментального исследования откольной прочности титанового сплава ПТ-3В и стали 12Х18Н10Т при изменении масштаба системы в 5 раз. Для титанового сплава исследовано влияние предварительной динамической пластической деформации 0,5–5 % и направления действия нагрузки относительно направления технологической прокатки на характеристики откольного разрушения. Установлено, что для исследованных металлов наблюдаются заметные масштабные эффекты при разрушении в условиях высокоскоростной одномерной деформации, которые имеют энергетическую природу. Для титанового сплава влияние технологического фактора и предварительной деформации менее выражено, чем для стали.

При создании крупногабаритных суперконтейнеров для транспортировки и хранения токсичных и радиоактивных материалов, в том числе содержащих заряды взрывчатого вещества (ВВ), важно значение фактических запасов их прочности. Поскольку в ряде случаев эти запасы определяются только расчетом, особые требования должны предъявляться к правильному выбору критериев разрушения, имеющих ясный физический смысл. Не менее важно при этом выяснение таких вопросов, как зависимости прочности конструкционных материалов при разрушении от объема нагружаемого объекта или масштабного фактора, а также прочности материала от технологического фактора, например, направления действия растягивающих напряжений относительно направления проката, прочности материала от предварительной динамической деформации и т. п.

В [1–5] установлено, что зависимость напряжения разрушения σ_p образца от времени пребывания τ под нагрузкой как проявление масштабного эффекта описывается с позиции энергетического подхода. Из опытов по отколу получено, что удельная (на единицу поверхности) работа отрыва материала λ зависит от времени τ и эта зависимость может быть представлена в исследованном диапазоне скоростей деформации в виде

$$\lambda = 2\gamma_0(\tau/\tau_0)^m,$$

где $2\gamma_0$ — удельная энергия образования поверхности; $\tau_0 = 10^{-13}$ с — период колебания атомов в решетке; m — показатель степени. Учитывая это и предполагая, как и в механике разрушения, что работа по отрыву материала осуществляется за счет запаса упругой энергии в образце, связь напряжения разрушения с временем пребывания образца под нагрузкой для падающего импульса прямоугольной формы может быть представлена в следующем виде

$$\sigma_p^2 = \frac{2\gamma E(1-\nu)}{c \cdot \tau_0^m} \tau^{m-1} [(1+\nu)(1-2\nu)]^{-1},$$

где E , ν , c — модуль Юнга, коэффициент Пуассона, скорость звука для материала образца.

© В. А. Огородников, А. Г. Иванов, В. И. Лучинин, А. А. Хохлов, А. П. Цой, 1995

Т а б л и ц а 1

Материал	$\sigma_{0,2}$, ГПа	$\sigma_{в}$, ГПа	δ , %	ψ , %	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	$2\gamma_0$, Дж см ⁻²	E , ГПа	ν	H_V , кг·мм ⁻²
Сталь 12Х18Н10Т	0,341	0,582	52	74,5	—	$3,9 \cdot 10^{-4}$	202	0,28	266
Титановый сплав ПТ-3В	0,66	0,755	13,5	24,5	90	7,2	112,1	0,32	328

Пр и м е ч а н и е. $\sigma_{0,2}$ — предел текучести; $\sigma_{в}$ — временное сопротивление разрушению; ψ — предельная пластичность; K_{1c} — коэффициент интенсивности напряжения; H_V — твердость по Виккерсу; толщина откола δ дана в % от толщины пластины.

Представляет практический интерес получение рассмотренных зависимостей для более широкого класса металлов, в частности для сплавов титана и стали. Так, хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т и титановый сплав ПТ-3В относятся к высокопрочным конструкционным материалам, широко применяемым в конструкциях, работающих при повышенных динамических нагрузках, в том числе в атомной энергетике, судостроении, при создании суперконтейнеров и т. п. Поведение этих материалов при динамическом нагружении исследовали как на отдельных образцах [6–12], так и в составе крупногабаритных оболочек при подрыве внутри них зарядов ВВ [13, 14]. Исследование физико-механических свойств стали 12Х18Н10Т после ее предварительного динамического деформирования [10, 11] выявило заметное влияние эффектов, связанных с предысторией нагружения. В частности показано, что после предварительной пластической динамической деформации ε_0 в диапазоне $\approx 2 \div 40$ % и при увеличении ее наблюдается монотонное повышение прочностных и снижение пластических свойств в направлении технологической прокатки. При этом в перпендикулярном направлении практически никаких изменений не происходит.

В данной работе исследуется влияние масштабного эффекта на высокоскоростное разрушение (откол) образцов из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ПТ-3В в недеформированном исходном состоянии и влияние предварительной динамической пластической деформации величиной $\varepsilon_0 = 0 \div 5$ % в направлении технологической прокатки на характеристики откольного разрушения образцов из титанового сплава с ориентацией оси параллельно и перпендикулярно направлению технологической прокатки.

Образцы стали диаметром 50 мм выполнялись из прутка в состоянии поставки. Образцы сплава ПТ-3В изготавливались из листового материала в исходном состоянии ($\varepsilon_0 = 0$) или из того же материала¹, подвергнутого различной степени динамической одноосной пластической деформации ($\varepsilon_0 = 0,5$ и 5 %). В дальнейшем эти образцы будем обозначать буквами А, Б, В. В обоих случаях из листового материала вырезали по две группы образцов диаметром 50 мм с ориентацией осей в двух взаимно перпендикулярных направлениях: параллельно (А1, Б1, В1) и перпендикулярно (А2, Б2, В2) направлению проката. Механические характеристики образцов с ориентацией оси параллельно направлению проката в исходном состоянии приведены в табл. 1.

Эксперименты с плоским соударением, постановка которых более подробно описана в [5], проводились на установке БУТ-76 при величине остаточного давления в стволе ~ 10 Торр. Образцы в форме дисков запрессовывались в обойму из того же материала с наружным диаметром 90 мм. Такие мишени при испытании образцов из стали 12Х18Н10Т нагружались

¹Использовался материал оболочек после их динамического нагружения.

ударниками из стали, а в случае образцов из сплава ПТ-3В — ударником из меди² диаметром 75 мм и толщиной ударника $\Delta_{уд}$, равной половине толщины мишени Δ_m . В экспериментах по исследованию масштабного эффекта размеры пар ударник — мишень выбирались из условия обеспечения одномерности деформации материала образцов и составляли в мм: 1,0–2,0; 2,5–5,0; 5,0–10,0, в остальных случаях 5,0–10,0.

Для каждой из пар ударник — мишень проводилось по 4–6 опытов, в которых скорость ударника изменялась таким образом, что реализовывались следующие нагружения образцов в мишени: I — отсутствие зародышей разрушения, наблюдаемых у микрошлифов продольного сечения образцов при увеличении в 500 раз; II — появление в плоскости откола отдельных зародышей разрушения в виде микротрещин или микропор; III — слияние отдельных зародышей разрушения в магистральную трещину; IV — полное разделение образца на части. В каждом опыте с помощью емкостного датчика с охранным кольцом осуществлялась непрерывная регистрация скорости свободной поверхности образца $W(t)$. Дополнительно в опытах измерялась скорость полета ударника W_0 к мишени с точностью $\leq 0,5\%$, что позволяло производить надежную нормировку зависимостей $\dot{W}(t)$, полученных емкостными датчиками с меньшей точностью. Значение максимальных растягивающих напряжений при отколе определялись с использованием профиля $W(t)$ по формуле

$$\sigma_p = 0,5\rho_0 c_0 \Delta W,$$

где ρ_0 — плотность материала; c_0 — объемная скорость звука, ΔW — разница скоростей в первом максимуме (W_1) и первом минимуме (W_2) зависимости $W(t)$ с учетом упругопластической поправки [15].

Результаты опытов приведены в табл. 2, где $\partial W/\partial t$ наклон графика $W(t)$ перед первым минимумом $\sigma_0 = 0,5\rho_0 c_0 W_0$; $\dot{\epsilon} = (\partial W/\partial t)/2c_0$ — скорость деформации материала в плоскости откола; δ — толщина откола.

На рис. 1 приведены фотографии микрошлифов продольного сечения образцов толщиной 10, 5 и 2 мм после их нагружения (случай II) для стали (рис. 1,а–в) и титанового сплава с ориентацией осей параллельно (A1) направлению проката (рис. 1,г–е) и перпендикулярно (A2) направлению проката (рис. 1,ж–и). Здесь же указаны значения W_0 при нагружении образцов. Для образцов из стали очаги разрушения представляют собой микропоры, формирующиеся вдоль оси образца, совпадающей с направлением технологического проката. При более интенсивном нагружении (случай III) они объединяются путем образования поперечных микротрещин. При этом зона разрушения материала, примыкающего к плоскости откола, уменьшается с изменением толщины образцов с 10 до 2 и от 1,3 до 0,2 мм соответственно. Для образцов из титанового сплава с различной ориентацией оси относительно направления проката заметного различия в кинетике разрушения не наблюдается. Очаги разрушения представляют собой комбинацию микропор и микротрещин, формирующихся в области откола. Заметных изменений нет и для образцов, подвергнутых предварительной пластической деформации (Б, В). Зона материала, охваченная разрушением, сокращается (с 1,2 до 0,3 мм) с уменьшением размеров образцов или длительности нагружения.

На рис. 2 приведены профили $W(t)$, полученные в опытах с образцами толщиной $\Delta_m = 10, 5$ и 2 мм при одной степени их повреждения (III), для стали и сплава ПТ-3В соответственно. Профили, полученные в

²Образцы из сплава ПТ-3В толщиной 2 мм нагружались ударниками из стали.

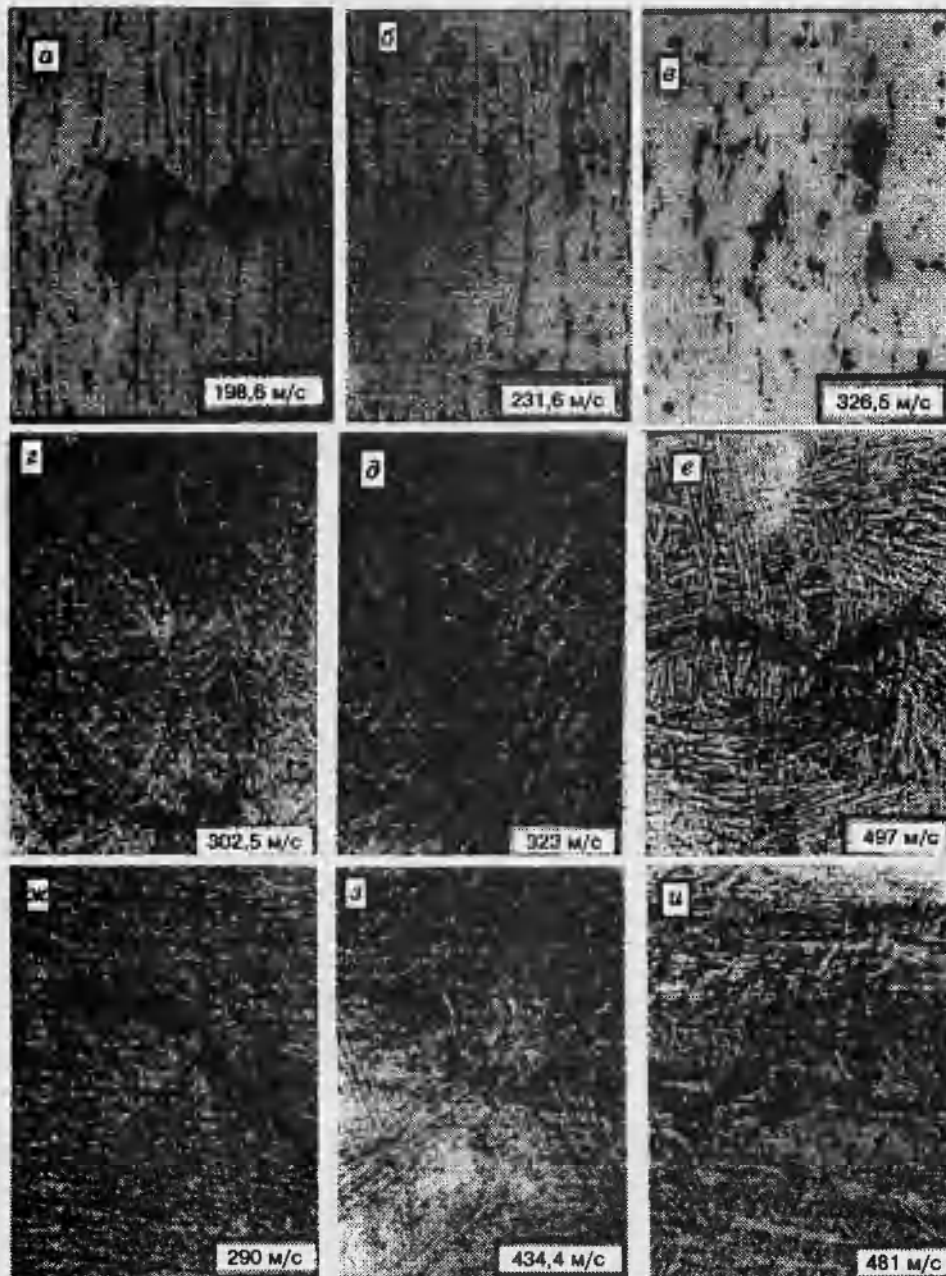


Рис. 1. Фотографии микрошлифов продольного сечения образцов. $\times 100$.

опытах при степени повреждения образца IV, практически не отличаются от приведенных на рис. 2, а при степенях повреждения I и II имеют особенности, связанные с повторением формы импульса сжатия в образце (I) или нерегулярностью формы $W(t)$ (II), что наблюдалось на примере опытов с медью и подробно описано в [5]. Можно отметить, что для образцов из стали независимо от их толщины процесс торможения откольной пластины затянут (см. рис. 2, а), что не наблюдается для образцов из титанового сплава (см. рис. 2, б). Не исключено, что это связано с кинетикой разрушения [5]. Из табл. 2 следует, что для образцов из титанового сплава

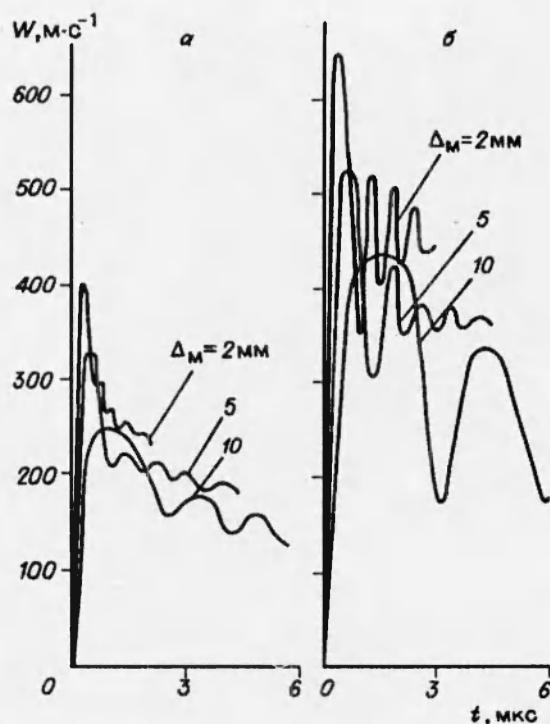


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов:

a — сталь I2X18N10T, *б* — титановый сплав ПТ-3В.

значения σ_p , оцененные по профилю $W(t)$, не увеличиваются при изменении Δ_M от 10 до 2 мм. При этом скорость деформации материала образца возрастает. Для образцов из стали наблюдается даже некоторое снижение σ_p при $\Delta_M = 2$ мм, что связано, по-видимому, с более вязким процессом разрушения и затянутым процессом торможения откольной пластины. Анализ полученных данных и специальная проверка измерительного комплекса свидетельствуют о том, что отмеченное поведение σ_p не связано с методическими погрешностями, например, с временным разрешением измерительного комплекса или перекосом ударника. Аналогичное поведение σ_p описано в [5] на примере опытов с медью.

В то же время из табл. 2 видно, что скорости ударников для любого критического события (I–IV) заметно возрастают с уменьшением масштаба системы, свидетельствуя о существовании масштабного эффекта. Поэтому, как и в [5], в качестве критерия разрушения примем величину, имеющую размерность удельной (на единицу поверхности) работы, в качестве которой можно использовать запас упругой энергии в образце λ . Если обратиться к опытам 5, 10, 12 со сталью, проведенными при $W_0 \approx 280 \div 290$ м/с, или к опытам с образцами из титанового сплава (22, 27, 30, 38, 41, 44) при $W_0 \approx 420 \div 430$ м/с, то из табл. 2 следует аналогичный с [5] вывод о том, что с увеличением масштаба системы в 5 раз степень повреждения материала в плоскости откола возрастает от отсутствия отдельных зародышей разрушения (1) до полного разделения образца на части (IV). Не вызывает сомнения, что это связано с увеличением запаса упругой энергии в стали с 9,8 до 53 Дж/см² при $\sigma_p = 2,5 \div 2,6$ ГПа и $\sigma_0 = 5,1 \div 5,3$ ГПа или с увеличением запаса упругой энергии в образ-

Т а б л и ц а 2

Материал	Ориентация образца	$\Delta_{уд}$, мм	$\Delta_{м}$, мм	Номер опыта	W_0 , м·с ⁻¹	W_1 , м·с ⁻¹	W_2 , м·с ⁻¹	$\frac{\partial W}{\partial t} \cdot 10^{-6}$, м·с ⁻²	σ_0 , ГПа	σ_p , ГПа	$\dot{\epsilon} \cdot 10^{-4}$, с ⁻¹	δ , мм	λ , Дж·см ⁻²	Степень повреждения	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
12X18H10T	A1	5,0	10,0	1	180,0	183	—	—	3,3	—	—	—	20,6	I	
				2	198,6	198	112	110	3,6	2,1	1,2	5,2	24,5	II	
				3	223,5	225	142	200	4,1	2,4	2,2	5,1	31,8	II	
				4	247,8	246	103	150	4,5	2,5	1,6	5,1	38,3	III	
				5	291,0	290	190	180	5,3	2,6	1,9	5,1	53,1	IV	
				6	312,1	319	225	200	5,7	2,6	2,2	5,1	61,4	IV	
		2,5	5,0	7	200	201	—	—	3,6	—	—	—	—	12,3	I
				8	231,6	224	129	250	4,2	2,2	2,4	2,6	16,7	II	
				9	260	255	115	440	4,7	3,5	4,8	2,5	20,9	II	
				10	279,7	280	116	230	5,1	2,6	2,5	2,6	24,6	III	
				11	325,7	330	210	375	5,9	3,0	4,0	2,5	32,9	IV	
		1,0	2,0	12	280	275	—	—	5,1	—	—	—	—	9,8	I
				13	326,5	327	220	610	5,9	2,5	6,6	1,0	13,9	II	
				14	332,4	330	250	410	6,1	1,8	4,4	1,1	14,1	II	
				15	378,3	376	255	585	6,9	2,7	6,3	0,9	18,0	II-III	
				16	403,2	400	290	410	7,3	2,3	4,4	1,0	20,1	III	
				17	450	440	365	400	8,2	1,9	4,3	1,0	25,4	III-IV	
				18	480	475	370	420	8,7	2,3	4,5	1,0	28,6	IV	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ПТ-3В	А1	5,0	10,0	19	285	345	—	—	4,1	—	—	—	52	I
				20	302,5	390	140	400	4,3	3,5	3,8	5,6	58	II
				21	388,0	490	295	450	5,3	3,6	4,3	5,6	88	III
				22	434	566	296	550	6,3	3,7	5,3	5,6	124	IV
	А2			23	275	337	—	—	4,0	—	—	—	50	I
				24	290	390	140	400	4,2	3,5	3,8	5,5	55	II
				25	338	430	163	400	4,6	3,5	3,8	5,5	66	III
				26	410	525	275	500	5,8	3,5	4,8	5,5	105	IV
		27	420	535	272	550	5,9	3,6	5,3	5,4	108	IV		
	А1	2,5	5,0	28	316,4	—	—	—	4,3	—	—	—	29	I
				29	323	415	170	500	4,5	3,6	4,8	2,5	32	II
				30	436,6	535	300	533	6,3	3,6	5,1	2,5	62	III
				31	448	592	342	500	6,3	3,5	4,8	2,5	62	III
				32	543,5	708	392	550	7,3	3,9	5,3	2,5	83	IV
	А2			33	305	375	—	—	4,3	—	—	—	29	I
				34	344,4	469	219	500	4,7	3,5	4,8	2,5	34	II
				35	345,5	431	141	500	4,7	3,9	4,8	2,5	34	II
				36	359,6	385	140	500	4,8	3,5	4,8	2,5	36	III
				37	392,8	490	240	650	5,3	3,5	6,3	2,4	44	III
		38	425,9	550	300	650	5,9	3,5	6,3	2,5	54	III		
39		468,4	668	382	—	6,5	3,6	6,3	2,5	66	III			
40		489,0	690	425	650	6,8	3,6	6,3	2,5	72	IV			

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ПТ-3В	А1	1,0	2,0	41	483	—	—	—	7,0	—	—	—	31	I	
				42	497	660	385	1100	7,3	3,6	10,6	1,0	33	II	
				43	578	800	520	1300	8,6	3,8	12,6	1,0	46	III	
	А2			44	430	—	—	—	6,1	—	—	—	23	I	
				45	481	640	350	1200	7,0	3,9	12,0	1,0	31	II	
				46	532,3	774,4	484,6	1400	7,5	3,9	13,5	1,0	35	III	
	Б1	5,0	10,0	47	563	790	510	1300	8,0	3,8	12,6	1,0	40	III	
				48	290	390	—	—	4,1	—	—	—	52	I	
				49	320	435	170	500	4,3	3,6	4,8	5,7	58	II	
				50	350	470	180	550	4,7	4,0	5,3	5,7	69	III	
				51	400	525	242	550	5,6	3,8	5,3	5,7	98	III	
				52	429,3	565	305	500	6,2	3,6	4,8	5,7	120	IV	
				Б2	53	290	390	—	—	4,1	—	—	—	52	I
					54	310	430	165	450	4,2	3,6	3,8	5,5	54	III
					55	388	480	213	550	5,3	3,7	5,3	5,5	88	III
					56	425	575	325	550	6,3	3,5	5,3	5,5	124	IV
	Б1	57	300	375	—	—	4,1	—	—	—	52	I			
		58	350	468	181	450	4,7	3,9	4,3	5,6	69	II			
		59	402	550	268	400	5,5	3,8	3,8	5,7	99	III			
		60	422	570	300	550	5,9	3,7	5,3	5,7	109	III			
		61	435	575	300	550	6,3	3,8	5,3	5,7	124	IV			
Б2	62	303	360	—	—	4,1	—	—	—	52	I				
	63	350	435	164	400	4,7	3,5	3,8	4,3	69	II				
	64	393	490	200	450	5,3	3,6	4,3	4,2	88	III				
	65	433,8	580	320	500	6,3	3,5	4,8	4,3	124	IV				

цах из титанового сплава с 31 до 124 Дж/см² (А1) и с 23 до 108 Дж/см² (А2) при $\sigma_p = 3,6-3,7$ ГПа, $\sigma_0 = 6,3-7,0$ ГПа (А1) и $\sigma_p = 3,5-3,6$ ГПа, $\sigma_0 = 5,9-6,1$ ГПа (А2).

Следуя [5], из опытов, объединенных по признаку одинаковой степени повреждения материала в плоскости откола (I, II, III или IV) для образцов различной толщины, а следовательно при различных значениях \dot{W}_0 или σ_0 , можно определить величины показателей степеней

$$m = 1 - 2 \lg \frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{0\gamma}} / \lg \frac{\delta_j}{\delta_i}$$

(с учетом $\delta = \sigma t$) для приведенной выше зависимости, где i, j — величины, полученные в опытах с разным масштабом. Оценки дают средние значения $m = 0,41 \pm 0,10$ для стали и $0,51 \pm 0,12$ для титанового сплава.

Таким образом еще раз подтверждено, что масштабный эффект при разрушении в условиях высокоскоростной одномерной деформации имеет энергетическую природу. Разрушение более крупных объектов происходит при больших запасах упругой энергии, поэтому сильнее проявляется в области взаимодействия волн растяжения.

Обратимся к опытам 19–27, где исследуется влияние технологического фактора на характеристики откольного разрушения титанового сплава ПТ-3В, связанного с направлением действия нагрузки относительно направления проката. Можно отметить, что для образцов в исходном состоянии (А1, А2) это влияние невелико. Так, величины λ для образцов с ориентацией оси, совпадающей с направлением проката (А1), превышают соответствующие величины для образцов с ориентацией оси перпендикулярно направлению проката (А2) на $\sim 15\%$, а значения σ_0, σ_p для тех же образцов — на $\sim 5\%$. Это связано, по-видимому, с близким характером кинетики процесса разрушения (см. рис. 1, *z-u*).

По результатам опытов 48–65 можно сделать вывод о том, что при $\varepsilon_0 = 0,5 \div 5\%$ предварительная динамическая пластическая деформация практически не влияет на характеристики откольного разрушения образцов из титанового сплава ПТ-3В с ориентацией осей в обоих направлениях (Б1, Б2 и В1, В2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 475–480.
2. Иванов А. Г. Динамическое разрушение и масштабные эффекты // ПМТФ. 1994. № 3. С. 116–131.
3. Иванов А. Г. Феноменология разрушения и откол // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 2. С. 97–104.
4. Иванов А. Г., Огородников В. А. Различаются ли хрупкие и пластичные тела при отколе? // ПМТФ. 1992. № 1. С. 102–106.
5. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. О природе масштабного эффекта при высокоскоростном разрушении (отколе) // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 6. С. 88–93.
6. Голубев В. К., Новиков С. А., Соболев Ю. С. и др. О механизмах откольного разрушения сталей Ст.3 и 12Х18Н10Т в температурном диапазоне 196...800 °С // Пробл. прочности. 1981. № 5. С. 67–70.
7. Дерibas А. А., Нестеренко В. Ф., Тесленко Т. С. Универсальная зависимость параметров упрочнения металлов от интенсивности ударно-волнового воздействия // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 6. С. 68–74.
8. Канель Г. И. Соппротивление материалов откольному разрушению // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 3. С. 77–84.

9. Капель Г. И., Разоренов С. В., Фортгов В. Е. Откольная прочность металлов в широком диапазоне длительности нагрузки // Докл. АН СССР 1984. Т. 275, № 2. С. 369-371.
10. Иванов А. Г., Кашаев Ю. Г., Коршунов А. И. и др. Влияние предыстории нагружения на механические свойства стали при одноосном растяжении // ПМТФ. 1982. № 6. С. 98-103.
11. Огородников В. А., Тюнькин Е. С., Иванов А. Г. Влияние предварительной деформации и технологического фактора на откольную прочность стали 12Х18Н10Т // Пробл. прочности. 1988. № 7. С. 66-68.
12. Вайнер Л. А., Дейч А. Ш., Кожевников О. А. и др. Исследование воздействия нейтронного облучения на механические свойства альфа-сплава титана // Атом. энергия. 1990. Т. 69, вып. 6. С. 382-386.
13. Герман В. Н., Цыпкин В. И., Минеев В. Н., Иванов Г. А. Поведение стали Х18Н10Т при комплексном воздействии ударного нагружения и высокоскоростной деформации // Пробл. прочности. 1981. № 9. С. 97-99.
14. Русак В. Н., Рыжанский В. А., Иванов А. Г., Заикин С. Н. Взрывостойкость сварных цилиндрических титановых оболочек // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 4. С. 148-156.
15. Степанов Г. В. Откольное разрушение металлов плоскими упруго-пластическими волнами // Пробл. прочности. 1976. № 8. С. 66-69.

Поступила в редакцию 8/XII 1994 г.
