

Таблица 4

Изнэнт-ропа	Состояния на изэнтропах			Состояния на ударных адиабатах пористых образцов				
	p_s , ГПа	E_s , кДж/г	ρ_s , г/см ³	$u = \sqrt{2E_s}$, км/с	D , км/с	ρ_{00} , г/см ³	ρ_r , г/см ³	$\frac{\Delta\rho}{\rho_s}$, %
1	89,7	2,091	11,36	2,045	5,91	7,42	11,35	0,1
	40,2	1,28	9,92	1,60	4,10	6,13	10,05	-1,3
	30,7	1,148	9,55	1,515	3,62	5,60	9,63	-0,8
	16,5	0,966	8,865	1,39	2,685	4,42	9,17	-3,4
	0,051	0,840	7,69					
2	96,0	1,796	11,81	1,895	6,19	8,18	11,79	0,2
	45,3	1,015	10,42	1,425	4,43	7,17	10,57	-1,4
	35,7	0,878	10,06	1,325	3,985	6,76	10,13	-0,7
	21,0	0,702	9,42	1,185	3,00	5,90	9,76	-3,6
	0,04	0,513	7,89					
3	49,3	0,825	10,91	1,285	4,80	7,99	10,91	0
	39,5	0,708	10,57	1,19	4,355	7,62	10,48	0,85
	24,8	0,535	10,03	1,035	3,44	6,97	9,97	0,6
	0,018	0,340	8,37					

По полученным экспериментальным данным способом, изложенным в п. 1, были определены параметры состояний меди с одинаковыми давлениями и энергиями, отвечающими изэнтропическому расширению сплошных и ударному сжатию пористых образцов. Значения параметров даны в табл. 4. Здесь же для изэнтроп приведены значения плотностей, реализующихся в состояниях, отвечающих разгрузке медных образцов в воздухе. В последнем столбце указана относительная разность между ρ_s и ρ_r . Как видно из табл. 4, за исключением двух случаев, относительная разность в плотностях во всех других состояниях не превышает 1,5%. Это свидетельствует о том, что вклад неравновесности, если она существует, при сжатии пористой меди при давлении $p > 20$ ГПа очень мал и требованиями теплового равновесия можно пренебречь.

Поступила 26 XI 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Кормер С. Б., Фунтиков А. И. и др. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнения состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах. — ЖЭТФ, 1962, т. 42, № 3.
2. McQueen R. et al. The equation of state of solids from shock wave studies. — In: High-Velocity Impact Phenomena/Ed. by R. Kinslow. N. Y.—L.: Acad. Press, 1970. Рус. пер. Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1974.
3. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. и др. Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности. — ПМТФ, 1981, № 2.
4. Альтшулер Л. В., Бушман А. В. и др. Изэнтропы разгрузки и уравнение состояния металлов при высоких плотностях энергии. — ЖЭТФ, 1980, т. 78, № 2.

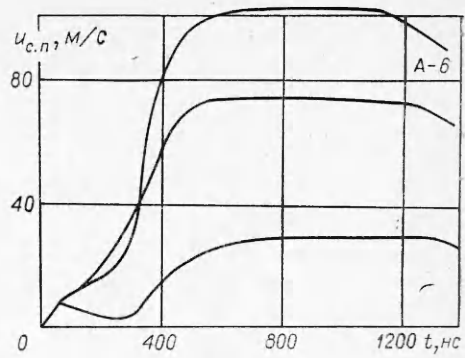
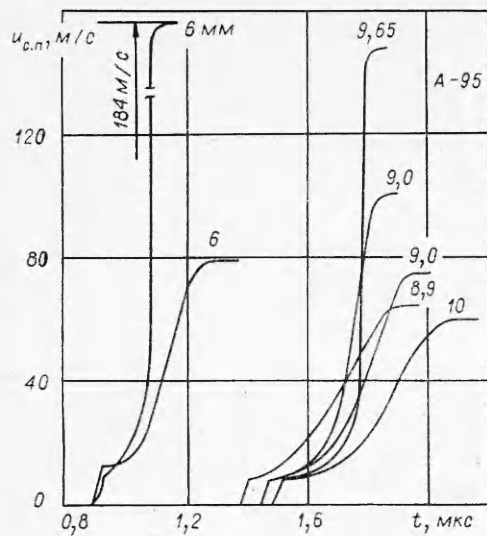
УДК 532.533, 539.374

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ

А. К. Диваков, Ю. И. Мецераков, Л. П. Фадиевко

(Ленинград)

В данной работе на основе анализа экспериментальных ударно-волновых характеристик алюминия А-95, А-6 и Д-16 исследована взаимосвязь зависящих от скорости деформации механических свойств материалов с кинетикой элементарных процессов пластической деформации и, в частности, с дисперсией массовой скорости частиц на фронте волны сжатия.



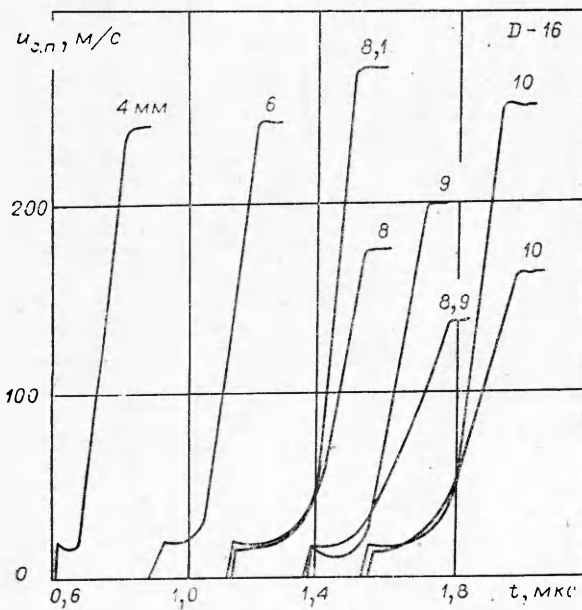
Ф и г. 2

Ф и г. 1

Для ударного нагружения образцов, имеющих форму диска диаметром 52 мм, использовалась пневматическая пушка калибра 35 мм [1]. Скорость полета снаряда варьировалась в пределах 20—270 м/с. Для определения скорости полета снаряда измерялся промежуток времени, за который снаряд пролетает фиксированное расстояние. Погрешность измерения не превышала 1%.

Измерение временных профилей скорости движения свободной поверхности мишеней и профилей напряжения осуществлялось двумя способами: лазерным дифференциальным интерферометром [2] с плечом задержки 11,7 нс и кварцевыми пьезодатчиками X-среза, работающими в режиме короткого замыкания [3]. Временные профили скорости смещения свободной поверхности для исследуемых материалов показаны на фиг. 1—3. На основе этих профилей построены динамические диаграммы $\sigma - \epsilon$. Величины напряжения при этом определялись с помощью соотношений, вытекающих из упругопластической модели материала:

$$\sigma = \rho c u \quad \text{при } u < u_{\text{упр}}, \quad \sigma = \rho c_* (u - u_{\Gamma}) + \sigma_{\Gamma} \quad \text{при } u > u_{\text{упр}},$$



Ф и г. 3

где c — продольная скорость звука; c_* — скорость пластического фронта; σ_{Γ} — упругий предел Гюгонио. С целью увеличения надежности данных максимальное значение скорости свободной поверхности в настоящих экспериментах определялось двумя способами: на основе измерения скорости снаряда и из формы интерферограммы по числу биений сигнала на переднем и заднем фронтах импульса сжатия. Как видно из фиг. 1—3, профили волн имеют плато, соответствующее максимальному значению скорости свободной поверхности.

Скорость пластических волн определялась с помощью соотношения $c_* = d/(t_y + \Delta t_{\text{п}})$, где d — толщина мишени (в опытах использовались мишени толщиной 2—15 мм); t_y — время прохождения упругой волны через мишень; $\Delta t_{\text{п}}$ — временной интервал между упругим предвестником и пластическим фронтом. В соответствии с анализом, проведенным в [4], этот интервал должен отсчитываться между серединами упругого и пластического фронтов. Зависимости скорости пластического фронта от скорости свободной поверхности для алюминия А-6 и А-95 показаны на фиг. 4 (линии 1, 2 соответственно).

Для построения динамических диаграмм $\sigma - \epsilon$ исследуемых материалов были определены их упругие постоянные — модуль всестороннего сжатия, константы Ламэ и др., для чего были проведены прецизионные ультразвуковые измерения скорости продольных и поперечных звуковых волн. Данные этих измерений представлены в табл. 1.

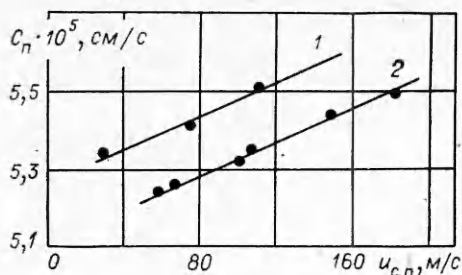
Результаты измерений ударно-волновых характеристик исследуемых материалов представлены в табл. 2. По этим данным можно построить динамические диаграммы $\sigma - \epsilon$. Для большей наглядности на фиг. 5 показаны ($\sigma_{\text{д}} - \sigma_{\text{г}}$) как функции скорости свободной поверхности для материалов А-95 и А-6 (линии 1, 2 соответственно, $\sigma_{\text{д}}$ — значение напряжения, соответствующее динамической диаграмме, $\sigma_{\text{г}}$ — напряжение, соответствующее гидростатической кривой). Из фиг. 5 видно, что разность ($\sigma_{\text{д}} - \sigma_{\text{г}}$) с увеличением скорости нагружения линейно возрастает, причем для алюминия А-95 крутизна линии выше, чем для А-6. Таким образом, оба материала проявляют зависимость механических свойств от скорости деформации, алюминий А-95 в большей степени, чем А-6. В отличие от этих материалов динамическая диаграмма сплава Д-16, построенная по данным табл. 2, проходит параллельно кривой гидростатического сжатия во всем исследуемом диапазоне нагружений, что свойственно материалам, не проявляющим скоростных свойств.

Т а б л и ц а 1

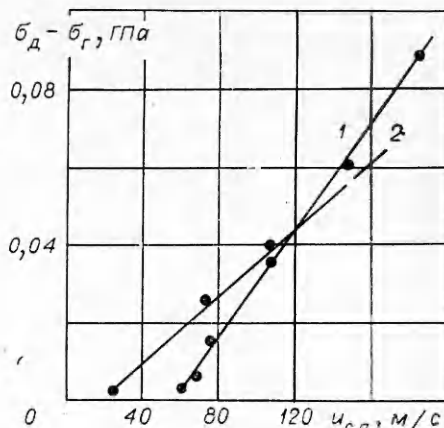
Материал	$c_{\text{н}}$, м/с	$c_{\text{д}}$, м/с	ρ , г/см ³
А-95	6427+10	3185+5	2,67
А-6	6444±6	3140+5	2,70
Д-16	6396+15	3120+60	2,75

Т а б л и ц а 2

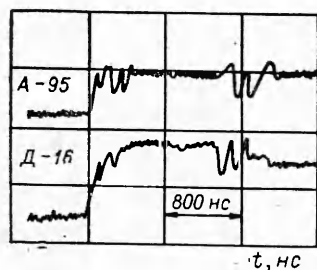
Материал	Скорость снаряда, м/с	Толщина мишени, мм	Толщина снаряда, мм	Скорость пластического фронта, км/с	Максимальное напряжение, ГПа	Деформация, % · 10 ⁻³
Д-16	106	8,9	5	5,47	0,805	9,68
	66	8,9	5	5,47	0,502	6,32
	132	8,9	5	5,48	1,005	12,04
	205	8,9	5	5,49	1,564	18,67
	230	9,0	5	5,51	17,32	21,20
	160	10	2	5,52	1,188	14,50
	246	10	2	5,48	1,874	22,44
	267	8,1	2	5,53	1,994	22,50
	174	8,0	2	5,51	1,333	15,76
	241	6,0	2	5,51	1,849	21,80
	240	4,0	2	5,44	1,814	22,00
	66	9,0	5	5,27	0,470	6,27
	60	9,7	5	5,26	0,426	5,70
	106	9,6	5	5,37	0,770	9,90
А-95	102	9,4	5	5,34	0,732	9,50
80	6,0	5	5,30	0,571	7,54	
147	9,65	2	5,44	1,079	13,76	
184	6,0	2	5,50	1,366	16,70	
А-6	74,5	9,35	5	5,42	0,545	6,87
109	9,4	5	5,50	0,772	9,93	
27	9,4	5	5,34	0,195	2,52	



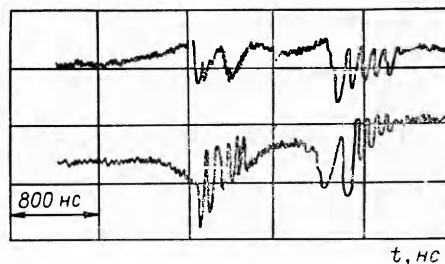
Ф и г. 4



Ф и г. 5



Ф и г. 6



Ф и г. 7

Наиболее интересным результатом настоящих экспериментов, на наш взгляд, является обнаружение однозначной взаимосвязи между зависимостью механических свойств материалов от скорости деформации, с одной стороны, и характером протекания элементарных процессов пластической деформации, с другой. Оказалось, что чем большей дисперсией скорости частиц в волне обладает материал, тем он в меньшей степени зависит от скорости деформации. Этот вывод вытекает из сопоставления динамических характеристик исследуемых материалов с соответствующими интерференционными сигналами биений, получающихся при зондировании свободной поверхности мишеней. Одной из специфических особенностей интерферометрической методики измерения скорости свободной поверхности мишени является возможность регистрировать наличие распределения частиц материала по скоростям. Как следует из анализа [5], сам принцип получения интерференционной картины от движущейся поверхности предполагает, что если на этой поверхности имеет место распределение частиц по скоростям (т. е. дисперсия массовой скорости), то амплитуда биений интерферометрического сигнала уменьшается. При достаточно широком распределении, соизмеримом с постоянной интерферометра, амплитуда биений вообще может стать равной нулю.

Показанные на фиг. 6 интерферограммы, снятые при одинаковой скорости снаряда ~ 66 м/с для материалов А-95 и Д-16, подтверждают вывод о корреляции скоростной зависимости механических свойств материала с дисперсией скорости частиц. Из этих интерферограмм видно, что в то время как для мишени из алюминия А-95 (проявляющего, как установлено выше, отчетливую зависимость от скорости деформации) имеется интерференционная картина импульса сжатия (упругий предвестник — 0,75 биения, пластический фронт — 2 биения и задний фронт импульса — 2,75 биения), для мишени из сплава Д-16 картина биений пластического фронта отсутствует вообще, хотя упругий предвестник и задний фронт импульса выписаны достаточно четко. Отсутствие биений на переднем фронте импульса в материале Д-16 наблюдается также и при других скоростях нагружения. Вместе с тем очевидно и другое: резкое уменьшение

амплитуды биений интерференционного сигнала, обусловленное дисперсией скорости частиц свободной поверхности, присуще только неустановившимся пластическим фронтам, в то время как для стационарных фронтов всегда наблюдается довольно четкая интерференционная картина. Волны сжатия в алюминии А-95 и А-6 в исследуемом диапазоне скоростей нагружения становятся стационарными на весьма малых глубинах от поверхности соударения ($\sim 1,5$ мм), и им соответствуют интерферограммы с четко выраженной картиной биений. Наоборот, в материале Д-16 при данных скоростях нагружения процесс установления волны заканчивается на глубинах $\sim 10-15$ мм, т. е. в момент регистрации пластического фронта интерферометром волна сжатия еще нестационарна. С другой стороны, хорошо известно [6], что чем выше амплитуда напряжения в волне сжатия, тем быстрее она становится стационарной. Этим объясняется тот факт, что при увеличении скорости нагружения картина биений интерференционного сигнала, соответствующего переднему фронту импульса, становится более четкой. Подтверждением этому служат интерферограммы, показанные на фиг. 7 и соответствующие одинаковым мишеням из Д-16 при различной скорости нагружения. На верхней интерферограмме виден упругий предвестник, равный $3/4$ биения, за которым следует зона релаксации. Передний фронт импульса от заднего отделяет плато длительностью $\sim 0,8$ мкм, на котором скорость свободной поверхности постоянна. Из интерферограммы видно, что в отличие от заднего фронта, которому соответствуют 5 биений, на переднем фронте биения отсутствуют вообще. Вместо них на месте пластического фронта виден колоколообразный импульс, длительность которого равна длительности переднего фронта, а вершина соответствует его середине. На нижней интерферограмме, полученной при большей скорости нагружения, оба фронта импульса сжатия имеют отчетливую картину биений.

В заключение авторы выражают благодарность А. И. Недбаю за проведение ультразвуковых измерений в исследуемых материалах с целью определения их упругих констант.

Поступила 17 XII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Мещеряков Ю. И., Мерозов В. А., Судьенков Ю. В. Экспериментальные методы исследования сильнонеравновесных процессов в твердых телах при импульсном воздействии электронным пучком и скоростном соударении.— В кн.: Физическая механика. Вып. 2. Л.: изд. ЛГУ, 1978.
2. Barker L. M. Behavior of dense media under high dynamic pressure. N. Y.: Gordon and Breach, 1968.
3. Graham R. A., Neilson F. W., Benedic W. B. Piezoelectric current from shock loaded quartz a submicrosecond stress gauge.— J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, N 5.
4. Barker L. M. α -phase Hugoniot in iron.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 6.
5. Asay J. R., Barker L. M. Interferometric measurements of shock-induced internal particle velocity and spatial variation of particle velocity.— J. Appl. Phys., 1974, vol. 45, N 6.
6. Johnson J. N., Barker L. M. Dislocation dynamics and steady plastic wave profile in 6061-T6 aluminium.— J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, N 11.

УДК 539.375.5

РОСТ ПОР В ПОЛОСЕ СДВИГА ПРИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В. М. Сегал

(Минск)

Анализ поведения пор в пластически деформируемом материале представляет большой интерес в связи с проблемой вязкого разрушения [1]. Решения для изолированных пор, находящихся под воздействием однородных полей напряжений и скоростей, приложенных на бесконечности, получены в [2, 3]; континуальное описание пластически дилатирующего материала, содержащего ансамбль пор, предложено в [4, 5] и др. Во всех случаях предполагалось, что течение в окрестности пор является устойчивым, а их первоначально сферическая или цилиндрическая форма сохраняется близкой к равновесной.