

Таблица 1

Значения σ_x и σ_y в ударно-сжатом алюминии

Материал экрана	u , км/с	Материал подложки	S_1, S_2 , мм	Первая волна (сжатия)					Вторая волна (сжатия или разгрузки)				
				$R_{x,1}/R_0$	$\sigma_{x,1}$, ГПа	$R_{y,1}/R_0$	$\sigma_{y,1}$, ГПа	$2\tau_0$, ГПа	$R_{x,2}/R_0$	$\sigma_{x,2}$, ГПа	$R_{y,2}/R_0$	$\sigma_{y,2}$, ГПа	$Y = \sigma_{x,2} - \sigma_{y,2}$, ГПа
Cu	0,35	Медь	0,15	1,222	7,74	1,212	7,37	0,37	1,301	10,72	1,290	10,3	0,42
		Фторопласт-4							1,127	4,30	1,114	4,04	0,26
Al	0,91	Медь	0,15	1,396	14,42	1,386	14,02	0,40	1,550	20,60	—	—	—
		Фторопласт-4	0,15 0,23						1,251	8,82	1,240	8,41	0,41
Al	$\approx 1,13$	Не было	0,15	1,526	19,60	1,516	19,20	0,40	—				

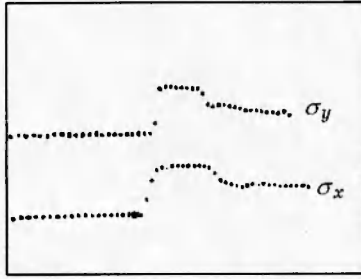


Рис. 2. Оциллограммы профилей импульсов напряжения σ_x и σ_y в алюминии: частота дискретизации 10 МГц; подложка — фторопласт-4

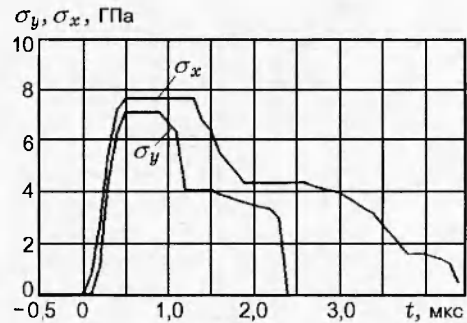


Рис. 3. Профили импульсов напряжения σ_x и σ_y в алюминии после обработки экспериментальных данных рис. 2

денные на рис. 3 профили импульсов напряжения в алюминии.

Давление ударного нагружения алюминия определяли по экспериментально измеренной величине электросопротивления R манганинового датчика в сжатом состоянии. При переходе от значений R/R_0 (отношения электросопротивления ударно-сжатого датчика к его сопротивлению в исходном состоянии) к давлению p использовали зависимость электросопротивления манганина от давления ударного сжатия $p = f(R/R_0)$ [5]. Для учета гистерезиса манганина в волне разгрузки брали зависимость из [6]. Результаты полученных экспериментальных данных обобщены в табл. 1. Каждое значение $\sigma_{x,1}$ и $\sigma_{y,1}$ в первой волне сжатия получено осреднением показаний 11–14 датчиков. К сожалению, из-за преждевременного обрыва датчиков не всегда удавалось зафиксировать вторую волну сжатия, особенно измерить $\sigma_{y,2}$ при догрузке. Поэтому значения $\sigma_{x,2}$ в табл. 1 являются осреднением показаний 5–8 датчиков, а значения $\sigma_{y,2}$ — 3–5 датчиков. Среднеквадратичные ошибки средних значений σ_x и σ_y для разных экспериментальных точек составляли $1 \div 3\%$. Данные эксперимента свидетельствуют о взаимосвязи между зафиксированными в каждом опыте значениями σ_x и σ_y , что не позволяет считать их независимыми. Поэтому авторы отказались от вычисления погрешности определения сдвиговой прочности Y как суммы среднеквадратичных погрешностей определения напряжений σ_x и σ_y (так как не учитывалась корреляция между σ_x и σ_y , что приводило к явно завышенным значениям погрешности определения Y). В качестве погрешности определения величины Y принималась среднеквадратичная ошибка ΔY , вычи-

сленная из совокупности значений Y , измеренных в каждом опыте. Для разных экспериментальных точек она составила $17 \div 50\%$. Уменьшению погрешности в определении Y способствовало и использование регистраторов типа С9-8 и СУПИ-19, что позволило одновременно фиксировать σ_x и σ_y не только в одном опыте, но и одним прибором, обрабатывая исходные экспериментальные данные на компьютере.

Были выполнены расчеты, моделирующие процесс установления напряжений в плоской УВ при ее прохождении через щели с датчиками. Расчетные времена установления напряжений для горизонтальных зазоров, меньших 0,3 мм, не превышают 0,4 мкс. Следовательно, σ_x надежно регистрируется в опытах до прихода догоняющей либо боковой разгрузки. Численное моделирование процесса распространения УВ в экспериментальной сборке, представленной на рис. 1, выполненное в двумерной постановке, показало, что в вертикальной щели всегда наблюдается течение в направлении распространения УВ, что заметно снижает напряжение σ_y . Если зазор S_2 велик, это приводит к сильно завышенным значениям сдвиговой прочности, что, вероятно, и отразилось на данных работ [1, 7]. Корректность измерений сдвиговой прочности данным методом обсуждается и в работе [8].

Для проверки правильности измерений двух главных напряжений выполнена серия контрольных опытов по определению сдвиговой прочности ударно-сжатой жидкости — насыщенного водного раствора хлористого цинка, начальная плотность которого $2,05 \text{ г/см}^3$, а ударная адиабата известна [9]. Схема этих опытов аналогична изображенной на рис. 1, с той разницей, что вместо образца алюминия

Таблица 2

Значения σ_x и σ_y в насыщенном водном растворе $ZnCl_2$

u_{Al} , км/с	S_1, S_2 , мм	Напряжения				$Y = \sigma_x - \sigma_y$, ГПа
		Продольное		Поперечное		
		R_x/R_0	σ_x , ГПа	R_y/R_0	σ_y , ГПа	
0,91	0,23	1,270	9,6	1,278	9,7	$\sigma_x \approx \sigma_y$
	0,43	1,271		1,277		

к экрану прилегал слой насыщенного водного раствора хлористого цинка толщиной 15 мм. Манганиновые датчики располагали в толще раствора. Их расположение относительно экрана оставалось прежним (на расстоянии 6 мм). Для изоляции датчиков использовали полиэтилен. Результаты измерений обобщены в табл. 2. Как видно из таблицы, в опытах этой серии $\sigma_x \approx \sigma_y$, что свидетельствует о корректности используемой методики.

Для получения дополнительной информации провели вторую серию опытов. В них с по-

мощью манганиновых датчиков зафиксированы профили первой волны нагружения алюминия и последующих волн догрузки и разгрузки. Результаты измерений использованы в качестве исходных данных для определения сдвиговой прочности ударно-сжатого алюминия другим, «самосогласованным» методом [2]. Отличие от экспериментов [2] состоит в том, что волновые профили в настоящей работе регистрировались манганиновыми датчиками, а не интерферометром.

Схема опытов второй серии отличается от приведенной на рис. 1 тем, что для опытов с догрузкой в качестве материала подложки использован цинк, а в опытах с разгрузкой подложка отсутствовала. Отсутствовала и вертикальная щель, и напряжение σ_y непосредственно не измерялось. В горизонтальной щели толщина манганинового датчика, вклеенного между алюминиевыми дисками при помощи эпоксидной смолы, равнялась 0,03 мм. Для изоляции пользовались слюдой. Величина зазора S_1 составляла 0,15 мм. Характерные осциллограммы второй серии опытов приведены на рис. 4, где $p_{\bar{n}}^+$ — ударная волна повторного нагружения, $p_{\bar{n}}^-$ — повторная волна разгрузки, $p_n(A)$ — состояние в первой волне ударного сжатия, $\Delta p_{упр}$ — амплитуда упругой волны разгрузки в волне разрежения, \bar{D}_1 и \bar{D}_2 — скорости первой и второй УВ.

В этом случае параметры сдвиговой прочности ударно-сжатого металла можно найти, экстраполируя экспериментальные зависимости $p_n^+(V)$ для повторного ударного догружения и $p_n^-(V)$ для разгрузки к одной изохоре (рис. 5). Точка A на рисунке соответствует состоянию в первой УВ, B — упругой догрузке, а C — упругой разгрузке; p_n — ударная адиабата алюминия. Такой подход позволяет найти напряжение сдвига τ_0 , значение девиатора $(4/3)\tau_0$ в первой волне нагружения и сдвиговую прочность Y .

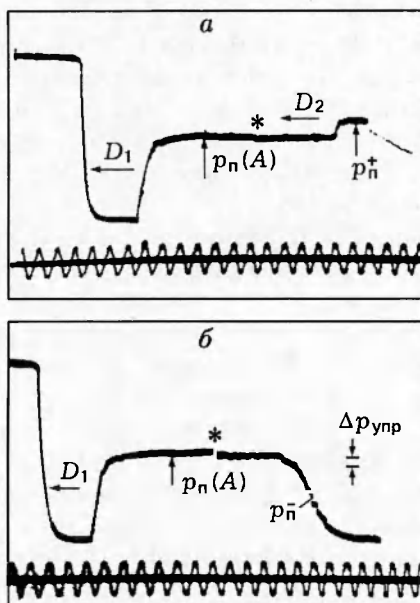


Рис. 4. Осциллограммы опытов по догрузке (а) и разгрузке (б) алюминиевого образца:

$p_n(A) = 16,2$ ГПа, $p_n^+ = 19,35$ ГПа, p_n^- — волна разрежения, $\Delta p_{упр} = 3,2$ ГПа; звездочками помечены моменты выхода первой волны нагружения на границу раздела алюминий — подложка (а) и на свободную поверхность алюминиевого образца (б); частота масштабных синусоид 10 МГц

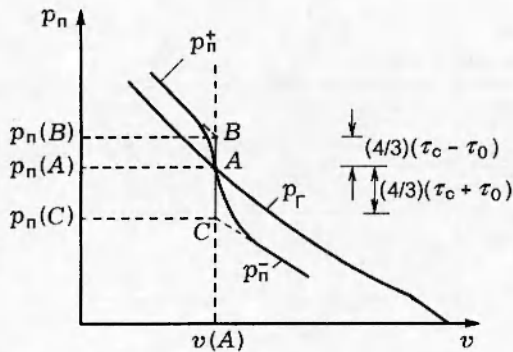


Рис. 5. Схема определения сдвиговой прочности алюминия «самосоогласованным» методом

Из соотношений «самосоогласованного» метода [2, 10] (см. рис. 5) получаем

$$2\tau_c = (3/4)[p_n(B) - p_n(C)],$$

$$2\tau_0 = (3/4)[2p_n(A) - p_n(B) - p_n(C)].$$

Описанные построения выполнены для догрузки и разгрузки алюминия, первоначально нагруженного до напряжения $p_n(A) = 16,2$ ГПа. Экстраполированные к изохоре $V(A)$ напряжения $p_n(B)$ и $p_n(C)$ оказались равными 16,55 и 15,15 ГПа соответственно, что дает значения $Y = 1,05$ ГПа, $2\tau_0 = 0,52$ ГПа.

На рис. 6 сопоставлены значения сдвиговой прочности алюминия, полученные в настоящей работе и в [1–4]. Из анализа представ-

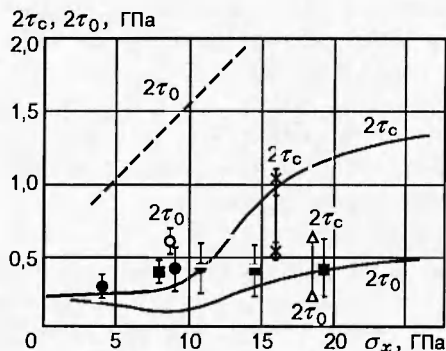


Рис. 6. Результаты экспериментальных определений сдвиговой прочности алюминия в УВ разной амплитуды:

данные настоящей работы: ■ — измерения τ_0 по разности $\sigma_{x,1} - \sigma_{y,1}$, ● — измерение τ_c по разности $\sigma_{x,2} - \sigma_{y,2}$, x — определение τ_0 и τ_c «самосоогласованным» методом; o — данные [4], Δ — данные [3]; сплошные линии — результаты [2], штриховая — измерения [1]

вленных результатов можно сделать следующие выводы.

1. До ударных давлений ≈ 10 ГПа разупрочнение во фронте УВ не происходит, но в сильной степени проявляется при амплитудах УВ в 14 ГПа и выше.

2. Значения сдвиговой прочности, зафиксированные в настоящей работе (см. рис. 6, символы ● и x) практически совпадают с измерениями Y в [2] (сплошная линия на рис. 6).

3. Зафиксированные в настоящей работе значения сдвиговой прочности алюминия марки АД1 существенно меньше опубликованных в [1] для этого же материала. Рассчитанные по данным работы [1] средние напряжения $p = (1/3)(\sigma_x + 2\sigma_y)$ лежат ниже нормальной изотермы [11], что с физической точки зрения невозможно и свидетельствует о существовании систематической погрешности выполненных в [1] измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Прочность алюминия, меди и стали за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 126–132.
2. Asay J. R., Chhabildas L. C. Determination of the shear strength of shock compressed 6061-T6 aluminum // Shock Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Metals / M. A. Meyers and L. E. Murr (Eds). New York: Plenum Publ. Corporation, 1981.
3. Дремин А. Н., Канель Г. И. Волны сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах // ПМТФ. 1976. № 2. С. 146–153.
4. Павловский М. Н., Степанюк В. С., Комиссаров В. В. Сдвиговая прочность свинца, олова, меди, алюминия, корунда и фторопласта-4 за фронтом ударной волны // Проблемы прочности. 1991. № 10. С. 50–54.
5. Павловский М. Н., Комиссаров В. В. Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения // ЖЭТФ. 1982. Т. 83, вып. 6(12). С. 2146–2151.
6. Grady D. E., Murri W. S., Fowles G. R. Quartz to stishovite; Wave Propagation in the Mixed Phase Region // J. Geophys. Res. 1974. V. 79, N 2. P. 332–338.
7. Батьков Ю. В., Новиков С. А., Сеницына Л. М., Чернов А. В. Исследование сдвиговых напряжений в металлах на фронте ударной волны // Проблемы прочности. 1981. № 5. С. 56–59.

8. Батьков Ю. В., Глушак А. Б., Глушак Б. Л. и др. Исследование напряженного состояния ударно-сжатых твердых тел методом главных напряжений // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 35, № 5. С. 114–121.
9. Трунин Р. Ф., Жерноклетов М. В., Кузнецов Н. Ф. и др. Динамическая сжимаемость водных растворов некоторых солей // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 12. С. 37–42.
10. Asay J. R., Lipkin J. A self-consistent technique for estimation of the dynamic yield strength of a shock loaded material // J. Appl. Phys. 1978. V. 49, N 7. P. 4242–4247.
11. Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е., Кузьменков Е. А. Изотермы и функции Грюнайзена 25 металлов // ПМТФ. 1987. № 1. С. 134–146.

*Поступила в редакцию 14/V 1997 г.,
в окончательном варианте — 7/V 1998 г.*
