

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УДАРНО-СЖАТЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ю. В. Батьков, А. Б. Глушак, Б. Л. Глушак,
С. А. Новиков, Н. Д. Фишман

*ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Кремлев*

Анализируются условия корректности измерений методом главных напряжений в сжатых плоской ударной волной твердых телах. Приведены результаты для конкретных экспериментальных устройств. Определено, что разность главных напряжений вдоль ударной адиабаты для молибдена, ванадия, стали 30ХГСА, керамики на основе окиси алюминия имеет постоянную величину в состояниях выше упругого предела Гюгонио.

Информация о напряженном состоянии твердых тел, сжатых ударными волнами (УВ), имеет большое значение для метрологии в физике высоких давлений, построения их определяющего уравнения, описания волновых процессов. Экспериментальные методы определения напряженного состояния ударно-сжатых веществ базируются на представлениях о характере их высокоскоростного деформирования в плоских УВ и волнах расширения. Эти методы рассматриваются в [1]. По методу регистрации главных напряжений (МГН), одно из которых σ_x перпендикулярно волновому фронту, а второе (σ_y или σ_z) лежит в его плоскости, осуществляется прямое измерение величин σ_x и σ_y . Это позволяет без обращения к дополнительной процедуре выявить девиатор напряжений, поэтому МГН обладает определенными преимуществами перед другими.

Предложенный в [2] МГН позднее применен для нахождения значений σ_x , σ_y в ударно-сжатом состоянии для металлов [1, 3], органических веществ [4, 5] и керамик [6, 7]. Техника измерений нормального напряжения σ_x хорошо известна и освоена (см., например, [8]). В то же время надежность измерений поперечных напряжений σ_y (или σ_z) не имеет строго обоснования [9]. Частично доказательства корректности измерений σ_y и необходимые для этого условия постановки эксперимента приведены в [5, 10].

Ниже приведены результаты исследований и опытные значения разности главных напряжений для ряда материалов (ванадий, молибден, арможелеза, сталь 30ХГСА, керамика хилумин).

Методика эксперимента

Суть метода главных напряжений заключается в измерении нормальных напряжений σ_x , σ_y в двух взаимно перпендикулярных сечениях образца из исследуемого материала, расположенных параллельно (σ_x) и перпендикулярно (σ_y) фронту стационарной УВ, с помощью пьезорезистивных датчиков напряжения, размещенных в этих сечениях. Датчики малой толщины заключали в изолирующие материалы и размещали в разрезах образца, ориентированных параллельно и перпендикулярно фронту УВ (рис. 1) [10]. Размеры образца выбираются такими, чтобы исключить влияние волны расширения с его боковой свободной поверхности и отраженной от свободной торцевой поверхности волны разгрузки на течение среды в области расположения датчика за время регистрации процесса:

отношение толщины образца к его диаметру 0,25. Датчик, регистрирующий σ_y , устанавливался на расстоянии 2 мм от сечения установки датчика, регистрирующего σ_x .

Измерение напряжений σ_x и σ_y в одном опыте исключает погрешность, связанную с изменением σ_x и σ_y от опыта к опыту с одним и тем же нагружающим устройством взрывного типа. Данное обстоятельство важно, поскольку разность $\sigma_x - \sigma_y$, как правило, невелика.

В экспериментах плоские УВ генерировались с помощью взрывных контактных устройств [11] с известными параметрами стационарной УВ в экранах из меди М1, алюминия АД1 и стали Ст.3. Длительность прямоугольного профиля σ_x на выходе из экрана > 1 мкс.

Для последующего анализа результатов измерений остановимся подробно на основных вопросах, связанных с регистрацией поперечных напряжений σ_y : 1) длительность стационарной фазы УВ в образце T_0 и время t_p установления стационарного течения в зазорах S_1, S_2 ; 2) величины S_1, S_2 (см. рис. 1) и их возможное влияние на σ_x и σ_y ; 3) геометрия чувствительных элементов датчиков; 4) материал изоляции датчиков.

Ответ на первые три вопроса может быть получен только в эксперименте. Относительно свойств материала изоляции априори выдвигается требование их максимальной близости к свойствам идеальной жидкости [5]. В этом случае сдвиговые напряжения материала образца не передаются чувствительному элементу датчика. В условиях механического равновесия исследуемого материала со слоем изоляции гидростатическое давление в изоляции равно σ_y в твердом теле, и калибровка датчиков для σ_x справедлива и для σ_y .

Из реальных материалов наилучшим приближением к свойствам идеальной жидкости обладают полимерные материалы (лавсан, фторопласт, полиэтилен). Не бесспорным представляется применение в [9, 12] в качестве материала изоляции тонких слоев слюды.

В специально выполненных для изучения затронутых вопросов экспериментах в каждом опыте манганиновыми датчиками П-образной конфигурации из проволоки марки ПЭМС диаметром 0,05 мм с длиной чувствительного элемента 10 мм одновременно измерялись напряжения σ_x и σ_y . Во всех опытах чувствительный элемент находился в полиизобутиловом клее между двумя слоями лавсановой пленки толщиной 0,04 мм. Общая толщина датчика составляла 0,11–0,13 мм. При установке в разрезы S_1 и S_2 (см. рис. 1) датчик дополнительно изолировался фторопластовой (или полиэтиленовой) пленкой толщиной 0,05–0,2 мм, так что суммарная толщина датчика и изоляции (величины S_1 и S_2) равнялась 0,23–0,53 мм. Как правило, меньшие значения S_1 и S_2 выбирались при измерении $\sigma_x \lesssim 10$ ГПа, а максимальные ($S_1 = S_2 = 0,53$ мм) — при $\sigma_x > 10$ ГПа.

Амплитудные значения σ_x, σ_y вычислялись по единой калибровочной зависимости напряжения σ , от относительного изменения сопротивления $\Delta R/R$ чувствительного элемента датчика [13]

$$\sigma_i [\text{ГПа}] = 34,5 (\Delta R/R) + 7,5 (\Delta R/R)^2.$$

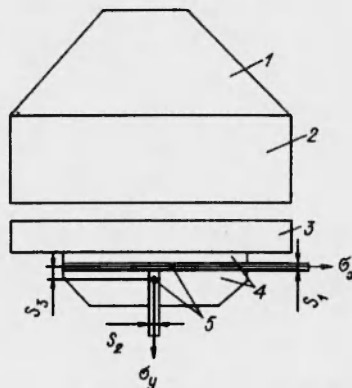


Рис. 1. Схема постановки экспериментов по измерению главных напряжений:

1 — плосковолновая линза; 2 — заряд ВВ; 3 — экран; 4 — элементы образца; 5 — чувствительный элемент манганинового датчика; S_1, S_2, S_3 — зазоры.

Относительная погрешность определения σ_x и σ_y в единичном опыте с надежностью 95 % составляла $\pm 8\%$.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты обработки осциллограмм напряжений в различных материалах сведены в табл. 1, 2, где t_{px} , t_{py} — время установления стационарного режима течения в зазорах S_1 ($\sigma_x = \text{const}$, $t > t_{px}$) и S_2 ($\sigma_y = \text{const}$, $t > t_{py}$) соответственно.

Таблица 1

Временные характеристики сигналов с поперечного датчика, регистрирующего σ_y

Материал образца	$S_1 = S_2$, мм	T_0 , мкс	t_{py} , мкс
АД1	0,35	1,0	0,4
Керамика	0,35	0,7	0,3
Цинк	0,35	0,8	0,5
Свинец	0,35	1,0	0,4
Свинец	0,53	0,7	0,3
Железо	0,53	1,2	0,4

Таблица 2

Длительность фронтов сигналов с датчиков, регистрирующих σ_x и σ_y

Материал образца	$S_1 = S_2$, мм	σ_x , ГПа	t_{px} , мкс	t_{py} , мкс
Сланец	0,35	3,5	0,50	0,50
Титан	0,35	4,3	0,50	0,50
Ванадий	0,35	4,4	0,65	0,35
Керамика	0,53	15,2	0,50	0,40
Никель	0,53	16,1	0,55	0,55
Железо	0,53	18,5	0,50	0,40

Характерные осциллограммы записи сигналов с датчиков для различных материалов показаны на рис. 2. Видно, что форма импульса напряжения σ_y в основных чертах воспроизводит с учетом временного сдвига форму импульса напряжения σ_x .

Результаты опытов (см. табл. 1, 2) свидетельствуют, что $t_{px} < T_0$ и $t_{py} < T_0$, т. е. время установления стационарного течения в зазорах S_1 и S_2 меньше длительности стационарной УВ, вводимой в образец даже при максимальных величинах S_1 и S_2 . Тем более это будет справедливо при $S_1 = S_2 < 0,53$ мм.

Таким образом, измерения σ_x и σ_y выполняются в стационарных условиях течения в зазорах. Из табл. 1, 2 также видно, что времена t_{px} и t_{py} весьма близки друг к другу.

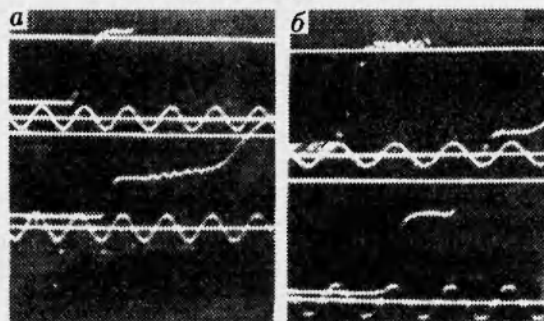


Рис. 2. Характерные осциллограммы записи главных напряжений (верхний луч — σ_x , нижний — σ_y , метка времени 1 мкс, $S_1 = S_2 = 0,35$ мм):

a — свинец; *б* — цинк.

Результаты экспериментов с различной толщиной изоляции S_1 и S_2 в зазорах для двух веществ, сильно отличающихся по своим свойствам, — парафина и керамики хилумин на основе окиси алюминия [7], приведены в табл. 3. В пределах опытной погрешности это влияние значений S_1 и S_2 отсутствует. С таким результатом хорошо согласуется факт совпадения расчетных (при известных параметрах нагружающего устройства) и опытных значений σ_x в исследованном диапазоне значений S_1 и S_2 .

Таблица 3

Влияние толщины прокладок S_1, S_2 на значение σ_x, σ_y

Материал образца	Материал изоляции	S_1 , мм	S_2 , мм	σ_x , ГПа	σ_y , ГПа
Парафин	Лавсан	0,13	0,13	0,69	0,69
		0,23	0,23	0,69	0,67
		0,35	0,35	0,69	0,69
	Лавсан + фторопласт	0,13	0,30	2,30	2,26
		0,35	0,35	2,31	2,25
		0,53	0,53	2,30	2,16
Керамика	Лавсан	0,13	0,13	6,5	2,6
		0,13	0,53	6,5	2,6
		0,53	0,13	6,5	2,4
	Лавсан + фторопласт	0,23	0,23	6,5	2,2
		0,35	0,35	6,5	2,6

Отметим вместе с тем, что увеличение S_1 и S_2 приводит к заметному возрастанию длительности переднего фронта напряжений при низких напряжениях σ_x и сравнительно слабо сказывается при $\sigma_x > 10$ ГПа.

Результаты измерений σ_y при заданных значениях S_1 и S_2 показали, что в пределах изменения величины S_3 (S_3 — расстояние установки поперечного датчика, регистрирующего σ_y , от плоскости установки датчика, регистрирующего σ_x) от 1 до 4 мм при общей толщине образца $10 \div 30$ мм значение S_3 не влияет на измеряемую величину σ_y . В опытах с Ст. 3 в пределах погрешности измерений не зарегистрировано влияние чувствительного элемента (провода, лента) на σ_y [10], что отмечается также в [9].

Таким образом, в конкретных условиях постановки эксперимента выполняются условия, необходимые для корректного измерения напряжений σ_x и σ_y и, соответственно, определения $\sigma_x - \sigma_y$.

Дальнейшее подтверждение корректности и достоверности измерений поперечного напряжения σ_y методом главных напряжений при реализации указанных выше условий может быть получено путем выявления на основе опытных результатов связи между σ_x и σ_y в средах, для которых соотношение между σ_x и σ_y задается известными теоретическими моделями.

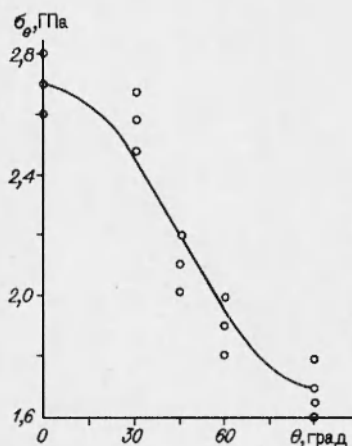


Рис. 3. Зависимость нормально-го напряжения σ_θ в оргстекле от угла установки θ датчиков относительно фронта УВ.

Из теории упругости и пластичности известно, что нормальные напряжения σ_θ на площадке с нормалью, наклоненной под углом θ к главной оси, определяются через главные напряжения:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta.$$

Результаты измерений σ_θ в сечениях образца, ориентированных под углом $\theta = 0$ для σ_x и 30, 45, 60 и 90° для σ_y к плоскости фронта УВ, на Ст. 3 [10] и оргстекле хорошо согласуются с теоретической зависимостью (рис. 3).

Результаты измерения σ_x , σ_y в ударно-сжатых материалах

По схеме (см. рис. 1), описанной в [10], измерены σ_x и σ_y в ударно-сжатых ванадии, молибдене, железе Армко, стали 30ХГСА и ПММА. Результаты измерений (кроме железа Армко) представлены в виде зависимостей разности главных напряжений $2\tau = \sigma_x - \sigma_y$ от амплитуды σ_x ударной волны (рис. 4).

Для молибдена, стали 30ХГСА и керамики сдвиговые напряжения в области амплитуд УВ, превышающих упругий предел Гюгонио σ_{HE} , в исследованном диапазоне σ_x имеют постоянное значение. Поведение хилумина, имеющего высокое значение τ , типично для керамик на основе окиси алюминия (см. например, [6]). Для молибдена результаты измерений хорошо согласуются с вычислениями разности главных напряжений между ударной адиабатой сжимаемости и изотермой. В вычислениях принималась $\sigma_{HE} = 3,1$ ГПа [14].

В средах, в которых за фронтом УВ реализуется квазигидростатическое состояние, $\sigma_x \cong \sigma_y \cong \sigma_z$. Результаты выполненных исследований на парафине (см. табл. 3) свидетельствуют о гидростатичности его состояния при $\sigma_x \approx 0,7$ и 2,3 ГПа.

В упругой области деформирования отношение между главными напряжениями определяется коэффициентом Пуассона $\nu = \sigma_y / (\sigma_x + \sigma_y)$. По [10], значения ν , вычисленные по результатам измерений σ_x и σ_y методом главных напряжений для Ст. 3 ($\nu = 0,28$) и стали 30ХГСА ($\nu = 0,30$), совпадают с известными литературными значениями. Согласно [7], величина ν для керамик на основе окиси алюминия (хилумин, КВПТ), полученная аналогичным образом, близка к измеренной статическим тензометрическим методом.

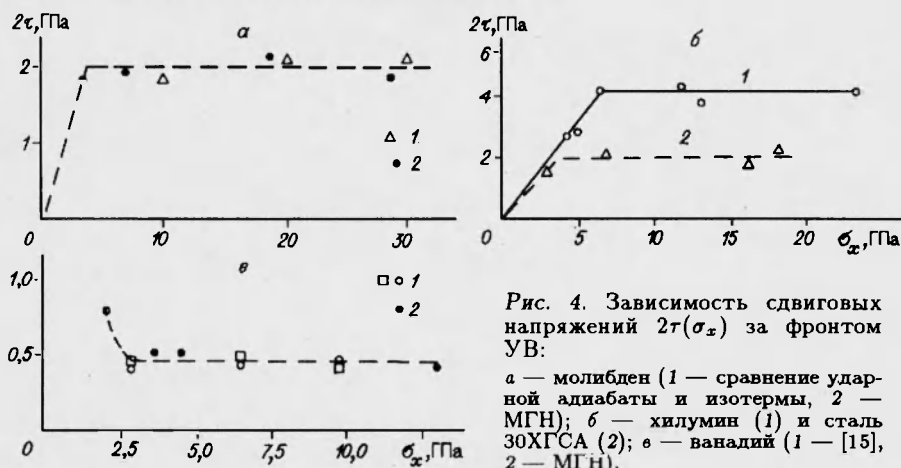


Рис. 4. Зависимость сдвиговых напряжений $2\tau(\sigma_x)$ за фронтом УВ: а — молибден (1 — сравнение ударной адиабаты и изотермы, 2 — МГН); б — ниобий (1) и сталь 30ХГСА (2); е — ванадий (1 — [15], 2 — МГН).

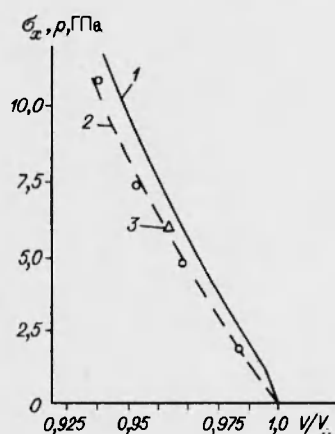


Рис. 5. Ударная адиабата (1) и изотерма (2) для α -фазы железа Армо. 1 — [17]; 2 — [16]; 3 — МГН.

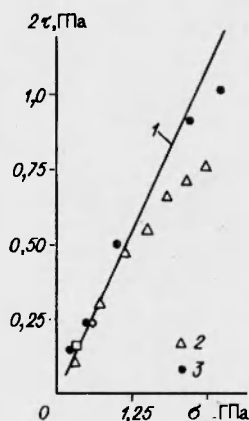


Рис. 6. Зависимость $\tau(\sigma_x)$ в оргстекле: 1 — [18]; 2 — [19]; 4 — настоящая работа.

Для ванадия (см. рис. 4, е) результаты в исследованном диапазоне напряжений находятся в хорошем соответствии с работой [15], в которой отмечается, что опытные данные согласуются с вычисленными по ударной адиабате и изотермической сжимаемости.

Экспериментальная точка 3 на рис. 5 для α -фазы железа Армо по давлению $p = (\sigma_x + 2\sigma_y)/3$ при измеренных значениях σ_x и σ_y в пределах ошибки эксперимента совпадает с изотермической кривой всестороннего сжатия [16]. В вычислениях использовано значение $\sigma_{HE} = 1,3$ ГПа и D - u -соотношение для α -фазы железа Армо [17].

Зависимость разности главных напряжений от σ_x для ПММА, определенная с использованием проволочных манганиновых датчиков, согласуется с результатами других исследователей, полученными также МГН, но с применением диэлектрических [18] и фольговых иттербиевых [19] датчиков в диапазоне $\sigma_x = 0,3 \div 3,0$ ГПа (рис. 6).

Выводы

Представлены результаты измерений главных напряжений в ударно-сжатых твердых телах с помощью пьезорезистивных датчиков на основе чувствительного элемента из манганиновой проволоки. Показано, что при корректной постановке опытов можно получить информацию о напряженном состоянии твердого тела за фронтом УВ. Это подтверждено специальными исследованиями, а также вычислением разности главных напряжений между ударной адиабатой и кривой всестороннего сжатия. Следует иметь в виду, что в последнем случае, поскольку величина $\sigma_x - \sigma_y$ невелика, в области напряжений (давлений) до нескольких десятков ГПа требуется знание истинных ударной адиабаты и изотермы с высокой степенью точности.

Метод главных напряжений, как следует из изложенного, позволяет определить сдвиговое напряжение твердого тела в сжатом состоянии. Однако ответа на вопрос, являются ли эти напряжения критическими, он не дает. Для этого необходимо привлекать, например, самосогласованный метод [20].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-16504).

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушак Б. Л., Куропатенко В. Ф., Новиков С. А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992.
2. Bernstein D., Godfrey S., Klein A., Shimmin W. Research on manganin transducers // Behaviour of Dense Media under High Dynamic Pressures. N. Y.: Gordon and Breach, 1968. P. 461-467.
3. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1979.
4. Батьков Ю. В., Новиков С. А., Фишман Н. Д. Исследование напряжений сдвига на фронте ударной волны в твердых ВВ // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 3. С. 120-122.
5. Chartagnac P. F. Determination of mean and deviatoric stress in shock-loaded solids // J. Appl. Phys. 1982. V. 53, N 2. P. 948-953.
6. Rosenberg Z., Yaziv D., Yeshurum Y., et al. Shear strength of shock-loaded alumina as determined with longitudinal and transverse manganin gauges // J. Appl. Phys. 1987. V. 62, N 3. P. 1120-1122.
7. Bat'kov Yu. V., Novikov S. A., Timonin L. M. Strength behind shock based on alumina // High Energy Rate Fabrication. Ljubliana, Yugoslavia, 1989. P. 246-262.
8. Канель Г. И. Применение манганиновых датчиков для измерения ударного сжатия конденсированных сред. М., 1974. Деп. в ВИНТИ. 28.02.74, № 477-74.
9. Павловский М. Н., Степанюк В. С., Комиссаров В. В. Сдвиговая прочность свинца, олова, меди, алюминия, корунда и фторопласта-4 за фронтом ударной волны // Пробл. прочности. 1991. № 10. С. 50-54.
10. Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Прочность алюминия, меди и стали за фронтом УВ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 126-132.
11. Павловский М. Н. Электросопротивление ударно-сжатого иттербия // ЖЭТФ. 1977. Т. 73, вып. 1.
12. Дремин А. Н., Канель Г. И. Волны сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах // ПМТФ. 1976. № 2. С. 146-153.
13. Ананьин А. В., Дремин А. Н., Канель Г. И. Структура ударных волн и волн разрежения в железе // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 9, № 3. С. 437-443.

14. **Chhabildas L., Barker L., Asay J., et al.** Spall strength measurements of shock-loaded refractory metals // Shock Compression of Condensed Matter-1989 / Ed. by S. C. Schmidt, et al. Amsterdam etc.: North-Holland, 1990. P. 429-432.
15. **Chhabildas L. C., Hills C. R.** Dynamic shock studies of vanadium // Metallurgical Application of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena / Ed. L. E. Murr, et al. N. Y., 1986. P. 429-448.
16. **Jephcoat A., Mao H., Bell P.** Static compression of iron to 78GPa with rare gas solids as pressure-transmitting media // J. Geophys. Res., B. 1986. V. 91, N 5. P. 4677-4684.
17. **Arnold W., Sachs W.** Measuring and simulation of steady-shock wave profiles in Armco Iron // Shock Compression of Condensed Matter-1989 / Ed. by S. C. Schmidt, et al. Amsterdam etc.: North-Holland, 1990. P. 429.
18. **Астанин В. В.** Исследования сопротивления материалов деформации под действием плоских упруго-пластических волн: Дис. ... канд. физ.-мат. наук Киев, 1978.
19. **Gupta S. C., Gupta Y. M.** Piezoresistance response of longitudinally and laterally oriented ytterbium foils subjected to impact bind foils and quasistatic loading // J. Appl. Phys. 1985. V. 57, N 7. P. 2464.
20. **Lipkin J., Assay J. R.** Reshock and release of shock-compressed 6061-T6 aluminium // J. Appl. Phys. 1977. V. 48, N 1. P. 182-189.

*Поступила в редакцию 5/V 1994 г.,
в окончательном варианте — 9/I 1995 г.*
