

24. Davison Lee, Stevens A. S. Continuum measure of spall damage.— J. Appl. Phys., 1972, vol. 43, N 3.
25. Дремин А. Н., Канель Г. И. Волны сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах.— ПМТФ, 1976, № 2.
26. Воловец Л. Д., Златин Н. А., Пугачев Г. С. Возникновение и развитие субмикротрещин в полиметилметакрилате при динамическом растяжении (отколе).— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 18.
27. Степанов А. В. Основы практической прочности кристаллов. М., Наука, 1974.
28. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. М., Наука, 1974.
29. Журков С. Н., Санфирова Т. П. Связь между прочностью и ползучестью металлов и сплавов.— ЖТФ, 1958, т. 28, № 8.
30. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., Наука, 1974.
31. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел.— УФН, 1972, т. 106, № 2.
32. Пинес Б. Я., Сиренко А. Ф. К вопросу о корреляции между скоростью ползучести и долговечностью под нагрузкой у металлов.— ФММ, 1960, т. 10, № 3.
33. McQueen R. G., Marsh S. P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock wave measurements.— J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, N 7.
34. Мороз Л. С., Хесин Ю. Д., Маринец Т. К. Исследование ползучести и длительной прочности железа при низких температурах.— ФММ, 1962, т. 13, № 6.
35. Ровинский Б. М., Рыбакова Л. М. Временная зависимость прочности при активном нагружении.— ФММ, 1960, т. 9, № 4.
36. Коттрел А. Х. Теоретические аспекты процесса разрушения.— В кн.: Атомный механизм разрушения. М., Металлургиздат, 1963.
37. Gilman J. J. Dislocation dynamics and the response of materials to impact.— Appl. Mech. Rev., 1968, vol. 21, N 8. Рус. пер. Динамика дислокаций и поведение материалов при ударном воздействии. Сб. Механика, 1970, № 2.
38. Зеликман А. Н. Металлургия редкоземельных металлов тория и урана. М., Металлургиздат, 1961.
39. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Структура и механические свойства металлов. М., Металлургия, 1970.
40. Speight C. S., Taylor P. F., Wallag A. A. Observation of spallation and attenuation effects in aluminium and beryllium from free surface velocity measurement.— In: Metallurgical effects of high strain rates. N. Y.— L., 1973.
41. Cochran S., Banner D. Spall studies in uranium.— J. Appl. Phys., 1977, vol. 48, N 7.

УДК 532.593

ИССЛЕДОВАНИЕ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ НА ФРОНТЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Ю. В. Батъков, С. А. Новиков, Л. М. Синицына, А. В. Чернов

(Москва)

Поведение материалов в области относительно небольших давлений ударного нагружения (до нескольких сотен килобар), представляющее большой практический интерес, например, для обработки металлов взрывом, во многом зависит от величины напряжений сдвига в процессах как ударного сжатия, так и последующего расширения.

Экспериментальным исследованиям напряжений сдвига в различных материалах в статических условиях испытаний при наложении гидростатического давления посвящены работы [1, 2]. Их результаты свидетельствуют о том, что при увеличении гидростатического давления критические сдвиговые напряжения, соответствующие переходу материала в пластическое состояние, монотонно возрастают.

Для изучения сдвиговых напряжений при нагружении материалов ударными волнами применялись методы: а) определение критических сдвиговых напряжений по амплитуде упругой волны сжатия, опережающей пластическую волну [3—5]; б) метод «догоняющей разгрузки» для определения критических

сдвиговых напряжений при расширении из ударно-сжатого состояния, основанный на изучении затухания ударной волны, возбуждаемой в материале ударом тонкой пластины [6—9].

В [3—5] показано, что критические сдвиговые напряжения для металлов, определенные по амплитуде упругой волны сжатия, превышают соответствующие величины, получаемые в статических экспериментах на простое растяжение или сжатие.

Зависимость критических напряжений сдвига металлов от давления в фазе разгрузки (работы [6—9]) имеет максимум, что объясняется прямо противоположным влиянием на величину сдвиговых напряжений давления и температуры в ударной волне. Критические сдвиговые напряжения растут с увеличением гидростатического давления и уменьшаются с ростом температуры; при достижении температуры плавления они должны обратиться в нуль, как в жидкости. На примере свинца это экспериментально показано в [7].

С разработкой методик измерения импульсных давлений с помощью манганиновых и диэлектрических датчиков [10, 11] появилась возможность непосредственно измерять напряжения сдвига в материалах, подвергающихся импульсному нагружению. В подобных экспериментах датчики весьма малой толщины вводятся в разрезы, сделанные в образце перпендикулярно и параллельно фронту распространяющейся в нем волны. Из-за небольших размеров датчика влияние его на картину волновых процессов в материале незначительно. В таких опытах измеряются напряжения, действующие по нормали p_n и параллельно p_τ фронту ударной волны. Поскольку для напряженного состояния, осуществляющегося при нагружении плоскими ударными волнами, p_n и p_τ являются главными напряжениями, то максимальные сдвиговые напряжения τ_c реализуются на плоскостях, наклоненных под углом 45° к фронту волны, и равны

$$\tau_c = (p_n - p_\tau)/2.$$

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования напряжений сдвига на фронте пластической ударной волны, следующей за упругим предвестником, в сталях и алюминии. В экспериментах измерялись напряжения p_n и p_τ с помощью манганиновых датчиков давления.

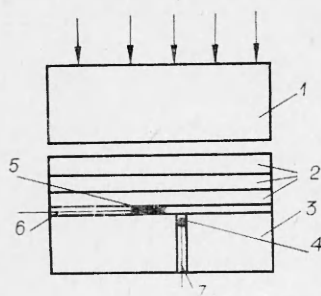
Схема постановки опытов представлена на фиг. 1 (1 — заряд ВВ, 2 — экран, 3 — исследуемый образец, 4, 5 — манганиновые датчики давления, 6, 7 — выводы датчиков). Для создания в исследуемых материалах ударных давлений различной интенсивности применялись взрывные устройства, описанные в [12]. Ударное нагружение образцов осуществлялось через экраны из стали, алюминия и меди.

Датчик давления выполнялся в виде T-образной петли из манганиновой проволоки ПЭММ диаметром 0,05 мм, площадью $10 \times 0,2$ мм². К датчику припаивались медные выводы толщиной 0,04 мм и шириной 1 мм. С обеих сторон датчик изолировался фторопластовой или лавсановой пленкой толщиной 0,04—0,10 мм. Общая толщина датчика составляла 0,20—

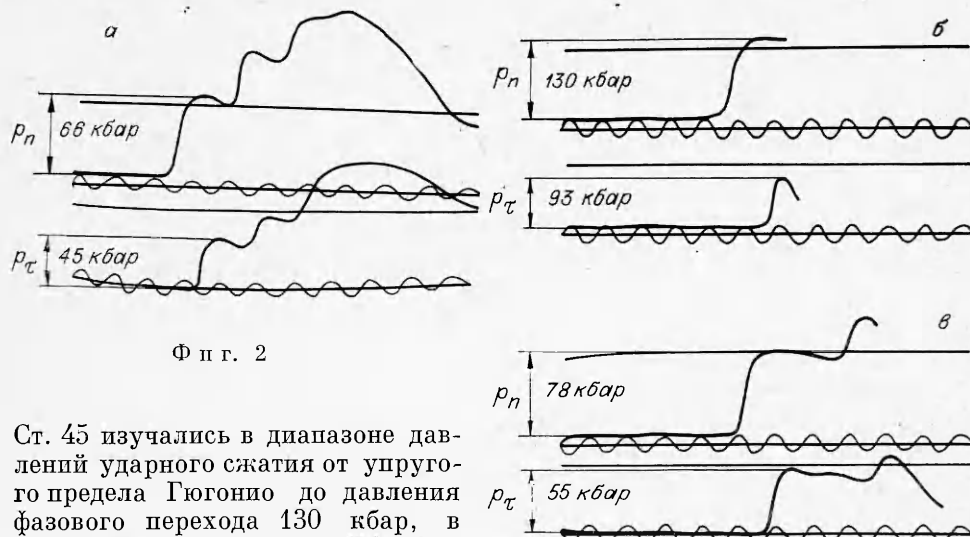
0,25 мм, сопротивление 5 Ом, амплитуда пропускаемого при измерении тока через датчик примерно 10А. Регистрация велась по мостовой схеме с применением прибора ПИИД-4 и осциллографа ОК-33 [13]. Чувствительность измерительного канала не менее 0,04 В/кбар, погрешность измерения давления не более 10%.

Наклейка датчиков с изолирующими пленками на исследуемый образец и заполнение пустот в щелях образца осуществлялись вакуумной смазкой.

Сдвиговые напряжения в сталях Ст. 3 и



Ф и г. 1

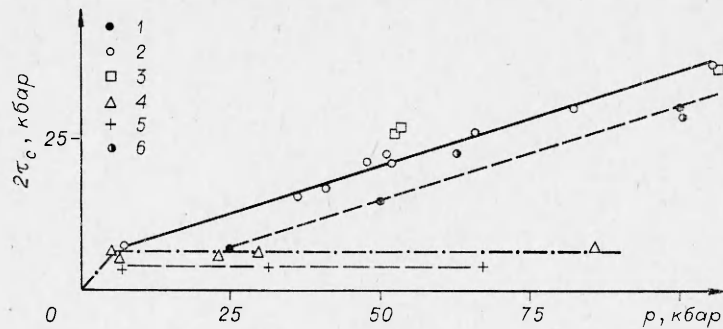


Ф и г. 2

Ст. 45 изучались в диапазоне давлений ударного сжатия от упругого предела Гюгоннио до давления фазового перехода 130 кбар, в алюминии до давления ~ 120 кбар.

Типичные осциллограммы, получаемые в экспериментах, приведены на фиг. 2 (*a* — определение сдвигового напряжения в Ст. 3 при давлении ударного сжатия ~ 70 кбар; *b* — определение τ_c в Ст. 45 в точке фазового перехода; *v* — определение напряжения сдвига в алюминии при давлении ударного сжатия ~ 80 кбар). Результаты исследований сведены в таблице. В ней также представлены результаты аналогичных измерений, выполненных другими авторами [14–16].

Исследуемый материал	Напряжение		Величина сдвигового напряжения $2\tau_c$, кбар	Источник	
	нормальное p_n , кбар	тангенциальное p_τ , кбар			
Ст. 3	12,0	5,0	7,0	Данная работа	
»	46,5	31,0	15,5		
»	52,0	35,0	17,0		
»	62,0	41,0	21,0		
»	66,0	45,0	21,0		
»	66,0	44,0	22,0		
»	83,0	57,0	26,0		
»	102,0	72,0	30,0		
»	130,0	93,0	37,0		
Ст. 45	70,0	44,0	26,0		Данная работа
»	71,0	44,0	27,0		
»	130,0	93,0	37,0		
Ст. 20	10,16	4,0	6,02	[14]	
»	26,9	21,2	5,7	[14]	
»	10,0	5,0	5,0	[15]	
»	34,0	27,4	6,6	[15]	
»	90,0	83,4	6,6	[15]	
Алюминий АД-1	78,0	55,0	23,0	Данная работа	
»	119,0	91,0	28,0		
»	37,0	32,0	5,0	[16]	
Алюминий Д-16	18,25	15,0	3,02		
»	170,0		$1,0 \pm 0,5$		
Алюминий В95	34,0	30,0	4,0	[15]	
»	70,0	66,0	4,0	[15]	
»	10,0	6,0	4,0	[15]	



Ф и г. 3

На фиг. 3 нанесены зависимости сдвиговых напряжений в сталях и алюминии АД-1 от гидростатического давления

$$p = (p_n + 2p_{\tau})/3$$

в координатах $2\tau_c - p$. Там же для сравнения представлены результаты работы [1], полученные в условиях гидростатического сжатия (точки 1, Ст. 45; точки 5 — данные работы [15], алюминий В95; 6 — данные авторов, алюминий АД-1).

Как и в статике, динамические зависимости $2\tau_c - p$ показывают плавное увеличение величины сдвиговых напряжений от давления. Однако результаты динамических экспериментов располагаются значительно выше соответствующих статических измерений. Это различие можно объяснить неоднородностью напряженного состояния по диаметру образца в статических измерениях, для которых τ_c есть сдвиговое напряжение, некоторым образом усредненное по площади образца. Провести подробный анализ статического эксперимента для более аккуратного сопоставления с нашими результатами не представляется возможным. Нельзя связать это расхождение с различием температур в двух видах экспериментов, так как в исследованном диапазоне давлений приращение температуры в ударных волнах невелико, тем более, что оно должно приводить к уменьшению величины напряжений сдвига.

Отметим также заметное различие в ходе полученных в данной работе зависимостей $2\tau_c = f(p)$ для Ст. 3 и Ст. 45 (точки 2, 3) с аналогичной зависимостью для Ст. 20, полученной в работах [14, 15] (точки 4), по данным которых τ_c не зависит от давления ударного сжатия в области до 90 кбар.

Обращает на себя внимание тот факт, что для двух исследованных сталей сдвиговые напряжения в точке фазового перехода совпадают, в то время как в промежуточной области (от упругого предела Гюгонио до давления фазового перехода) они значительно отличаются.

Поступила 24 VIII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещагин Л. Ф., Шаночкин В. А. Влияние гидростатического давления на сопротивление сдвигу в твердых телах. — Физика металлов и металловедение, 1960, т. 9, вып. 2.
2. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М., ИЛ, 1955.
3. Иванов А. Г., Новиков С. А., Синицын В. А. Исследование упругопластических волн в железе и стали при взрывном нагружении. — Физика металлов и металловедение, 1963, т. 5, вып. 1.

4. Новиков С. А., Синицын В. А., Иванов А. Г., Васильев Л. В. Упругопластические свойства ряда металлов при взрывном нагружении.— Физика металлов и металловедение, 1966, т. 23, вып. 3.
5. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений.— УФН, 1965, т. 85, вып. 2.
6. Curren D. R. Nonhydrodynamic attenuation of shock waves in aluminium.— J. Appl. Phys., 1963, vol. 34, N 9.
7. Новиков С. А., Синицына Л. М. О влиянии давления ударного сжатия на величину критических напряжений сдвига в металлах.— ПМТФ, 1970, № 6.
8. Альтшулер Л. В., Бражник М. И., Телегин Г. С. Прочность и упругость железа и меди при высоких давлениях ударного сжатия.— ПМТФ, 1971, № 6.
9. Erkman D. R., Christensen A. B. Attenuation of shock waves in aluminium.— J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, N 13.
10. Батьков Ю. В., Новиков С. А., Синицына Л. М., Чернов А. В. Исследование адиабат расширения оргстекла и текстолита, сжатых ударными волнами до давлений ~ 30 кбар.— Механика композитных материалов, 1979, № 2.
11. Степанов Г. В. О методике регистрации упругопластических волн напряжений в твердых телах с помощью диэлектрического датчика.— Проблемы прочности, 1972, № 10.
12. Баканова А. А., Дудолов И. П., Сутулов Ю. Н. Ударная сжимаемость пористых вольфрама, молибдена, меди и алюминия в области низких давлений.— ПМТФ, 1974, № 2.
13. Батьков Ю. В., Вишневецкий Е. Д. Аппаратура для измерений импульсных давлений пьезорезистивными датчиками в диапазоне 0,1—20 ГПа.— В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., 1976.
14. Степанов Г. В., Астанин В. А. Определение сопротивления материала сдвигу за фронтом плоской ударной волны.— Проблемы прочности, 1976, № 4.
15. Астанин В. А. Исследование сопротивления материалов деформации под действием плоских упругопластических волн разгрузки. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. ИПП АН УССР, Киев, 1978.
16. Дремин А. Н., Канель Г. И. Волна сжатия и разрежения в ударно-сжатых металлах.— ПМТФ, 1976, № 2.

УДК 532.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЯ В СТЕКЛОТЕКСТОЛИТЕ И ФТОРОПЛАСТЕ ПРИ ИХ БЫСТРОМ РАЗОГРЕВЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, В. А. Свиридов, А. В. Чернов
(Москва)

1. В результате быстрого разогрева конденсированной среды до концентраций поглощенной энергии излучения, много меньшей теплоты испарения, в среде возбуждаются волны напряжений [1 — 3]. Их регистрация позволяет получить информацию о физических свойствах облучаемого вещества.

Пусть распределение концентрации поглощенной энергии по координате подчиняется экспоненциальному закону $\varepsilon(x) = \varepsilon_0 e^{-\mu x}$, где μ — линейный коэффициент поглощения; ε — концентрация поглощенной энергии. Распространение волн напряжения в акустическом приближении при одномерной деформации полубесконечной жидкой среды или при одномерной деформации линейно-упругого полупространства в режиме мгновенного разогрева в безразмерных переменных описывается волновым уравнением

$$\partial^2 S / \partial \xi^2 = \partial^2 S / \partial \tau^2.$$

Решение этого уравнения с начальными и граничными условиями

$$S(\xi, 0) = e^{-\xi}, \quad S(0, \tau) = 0$$