

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА В АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т В ДИАПАЗОНЕ НАПРЯЖЕНИЙ ДО 200 ГПа В ИНТЕРЕСАХ КАЛИБРОВКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. К. Якунин, Д. Г. Панкратов, Е. А. Козлов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Введение

Интерес к изменению продольных c_l и объемных c_b скоростей звука в ударно-сжатом веществе объясняется тем, что они являются определяющими величинами во многих процессах, связанных с ударными волнами и волнами разрежения, таких как упругопластическое течение, фазовые превращения, затухание УВ в веществе и т. д. Измерения продольной $c_l(\sigma_{xx})$ и объемной $c_b(\sigma_{xx})$ скоростей звука в ударно-сжатых материалах позволяют получить информацию об их упругопластических свойствах, а именно: модулях продольной и объемной упругости, модуле сдвига, коэффициенте Пуассона, параметре Грюнайзена. Более того, так как упругие модули разных фаз одного и того же материала существенно различаются, то по скачкообразному изменению зависимостей $c_l(\sigma_{xx})$ и $c_b(\sigma_{xx})$ можно судить об изменении фазового состава материала вдоль его ударной адиабаты и уточнять координаты пересечения ударной адиабаты с границами фазовых равновесий в p, T -плоскости [1].

В экспериментах применялся метод догоняющей разгрузки [2]. Суть метода – регистрация моментов прихода головных характеристик волн разрежения, приводящих к изменению регистрируемых параметров течения: величины продольного напряжения, массовой скорости, скорости свободной поверхности или интенсивности излучения индикаторного вещества, находящегося в контакте с исследуемым образцом.

Источником излучения служит нагретый ударной волной изучаемый образец, а также вещество-индикатор, подвергнутое ударному нагружению. Опубликованы работы по исследованию динамической сжимаемости как твердых, так и жидких индикаторов, а также по исследованию зависимости температуры ударно-сжатого индикатора от интенсивности ударной волны [3, 4].

Материал, образцы, индикаторы и условия их взрывного нагружения

В данной работе исследовалась нержавеющая сталь 12Х18Н10Т ($\rho_0 = 7,89 \text{ г/см}^3$). Ударная адиабата стали 12Х18Н10Т хорошо изучена [5–7]. Статические механические свойства: $\sigma_T = 0,20 \text{ ГПа}$, $\sigma_B = 0,55 \text{ ГПа}$ при $T = +20 \text{ }^\circ\text{C}$. Химический состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т, по [8], приведен в табл. 1. Эта сталь при нормальных условиях стабилизируется в γ -фазе (гранецентрированный куб). По данным [9], при нормальных условиях скорость продольной волны в стали 12Х18Н10Т равна $c_{l0} = 5,74 \text{ км/с}$, объемная скорость – $c_{b0} = 4,56 \text{ км/с}$.

Образцы представляли собой диски, имеющие четыре ступени секторной формы (рис. 1). Толщина ступеней h выбиралась по результатам проведенных расчетно-теоретических оценок изучаемых процессов. При выборе высоты ступеней учитывалось влияние волн боковой разгрузки с торцов образца, а также возможное наличие кумулятивных струй, являющихся следствием ступенчатой формы образца.

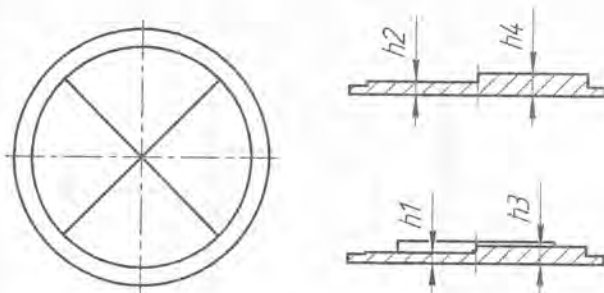


Рис. 1. Конструкция четырехступенчатого образца

Химический состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т, % масс

Таблица 1

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Cu
Не более						Не более		
0,12	0,8	2,0	17,0–19,0	9,0–11,0	0,6–0,8	0,020	0,035	0,30

Взрывное нагружение образцов осуществлялось с использованием как современных малогабаритных нагружающих устройств с зарядами ВВ $\varnothing 60$ мм и массой до 300 г ТНТ, так и ранее разработанных зарядов ВВ $\varnothing 120$ и 200 мм с массами ВВ от 5 до 25 кг ТНТ.

В качестве индикаторов при измерениях скоростей звука можно использовать различные материалы, среди них – жидкости: спирты, хлор- и бром-производные метана; твердые тела: плавленный и кристаллический кварц, стекла большой плотности, LiF и др.

В данной работе при проведении большинства экспериментов по измерению скоростей звука в качестве индикатора использовался хлороформ (CHCl_3), $\rho_0 = 1,483 \text{ г/см}^3$ [3]. Применение хлороформа связано с его хорошей изученностью и относительной дешевизной. Кроме этого, хлороформ позволяет проводить исследования на открытом воздухе практически в любое время года; при атмосферном давлении он кристаллизуется при -60°C .

Метод, положенный в основу измерения скоростей звука

При измерениях скоростей звука реализуется метод догоняющей разгрузки. Используется соударение пластины-ударника и образца из изучаемого материала с известными ударными адиабатами. В простейшем варианте метода ударник и образец изготовлены из одного материала («симметричный» удар). При соударении образуются ударные волны (УВ), которые распространяются в исследуемый образец и ударник. Исследуемая волна разрежения создается на тыльной поверхности ударника при выходе на нее УВ и распространяется через ударник в исследуемый образец, где догоняет ударную волну.

В случае использования индикатора, расположенного после исследуемого вещества и обладающего способностью светиться (рис. 2,а), форма выходного электрического сигнала с фотодетектора, регистрирующего данное свечение, будет иметь вид, показанный на рис. 2,б.

По изменению интенсивности свечения фронта УВ в индикаторе можно судить о времени догона фронта УВ первыми характеристиками упругой и пластической разгрузки. Это можно использовать для расчетно-экспериментального определения скорости звука в изучаемом ударно-сжатом материале.

Скорость распространения продольной (объемной) волны разрежения в ударно-сжатом образце и ударнике из одного материала («симметричный» удар) рассчитывается по формуле

$$c = \left(D - \frac{W}{2} \right) \frac{R+1}{R-1}, \quad (1)$$

где D – скорость УВ в материале; W – скорость полета ударника к образцу; $R = X_{\text{дог}}/h_{\text{уд}}$ – отношение расстояния в образце, на котором первая характеристика веера упругой (пластической) волны разрежения догоняет ударную волну, к толщине ударника.

Если же материалы образца и ударника различны («несимметричный» удар), то лагранжева скорость звука имеет вид

$$c^{\text{обр}} = \frac{c^{\text{уд}} D^{\text{уд}} R - u^{\text{обр}} (c^{\text{уд}} + u^{\text{обр}} + D^{\text{уд}} - W)}{c^{\text{уд}} \frac{D^{\text{уд}}}{D^{\text{обр}}} R - (c^{\text{уд}} + u^{\text{обр}} + D^{\text{уд}} - W)}. \quad (2)$$

Как видно из формул, для расчета скоростей звука в образце надо знать характеристики ударника. Кроме этого, при пересчете местной (лагранжевой) скорости звука в образце в ее абсолютное значение необходимо учитывать тот факт, что вещество образца движется со скоростью $u_{\text{обр}}$.

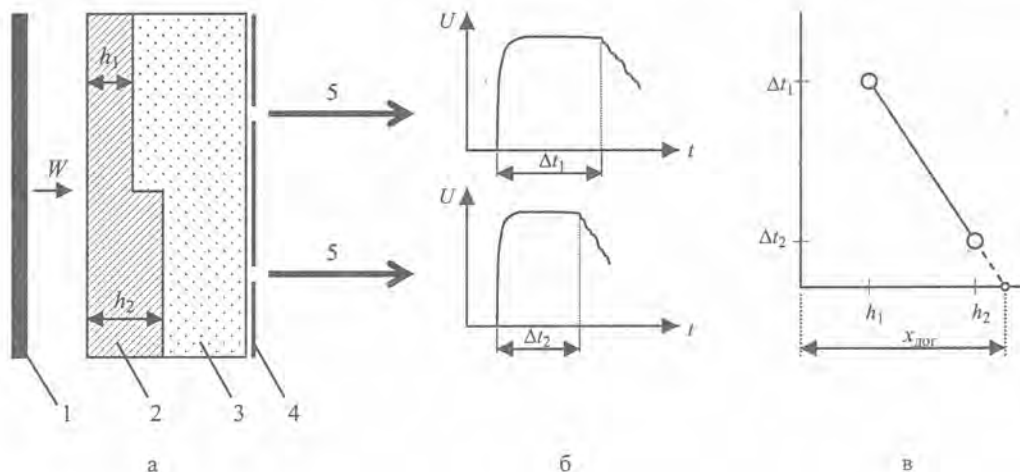


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению скорости звука: а) 1 – ударник; 2 – ступенчатый образец; 3 – индикатор; 4 – диафрагма; 5 – световоды; б) регистрируемые осциллограммы (U – амплитуда сигнала, Δt – время догона; в) нахождение $X_{\text{дог}}$ экстраполяцией данных зависимости $\Delta t(h)$

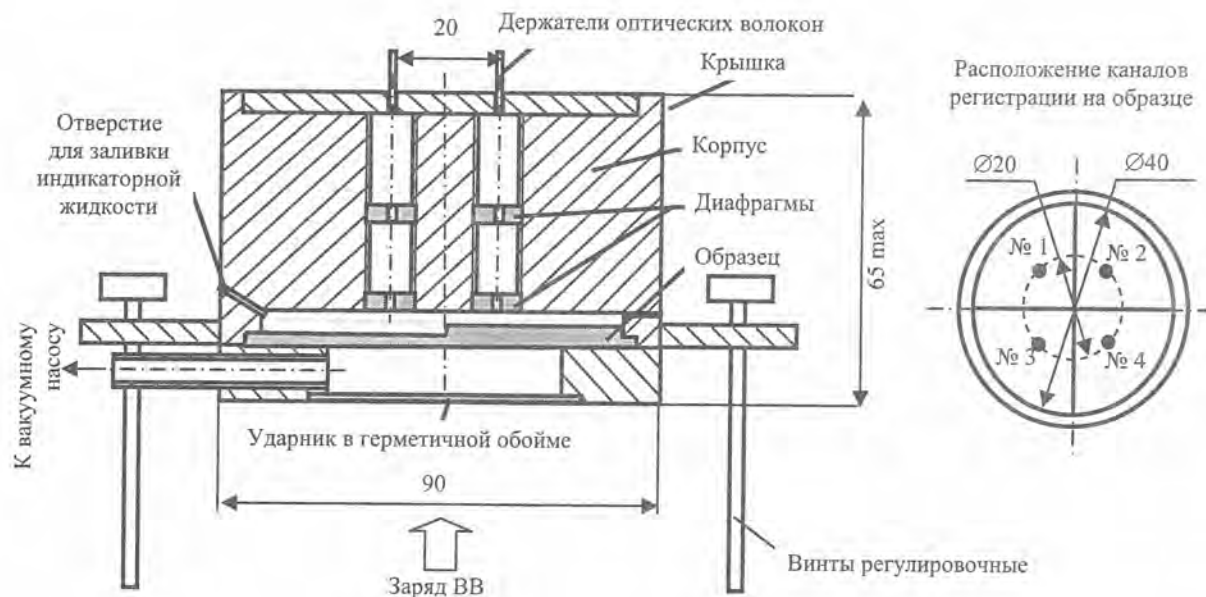


Рис. 3. Эскиз измерительного узла (не в масштабе)

Конструкция экспериментального узла

Типовой эскиз экспериментального узла (не в масштабе) представлен на рис. 3.

Применяемый узел герметичен в месте нахождения индикаторной жидкости, светоизолирован от внешней засветки, проведена светоизоляция каналов регистрации друг от друга. Расположение каналов регистрации выбрано таким образом, чтобы не попадать в область, охваченную возмущениями как от краев узла, так и от ступеней образца. Кроме этого, часть узла с ударником вакуумируется. В зависимости от геометрических размеров применяемого измерительного заряда размеры узла также меняются – чем больше заряд, тем больше узел.

В каждом опыте выбирались диаметры апертурных диафрагм, расстояние от поверхности образца до торцев световодов (высота узла), диаметр световода и толщина слоя индикатора. Выбор происходил на основе расчетных оценок ожидаемого выходного электрического сигнала с фотодетектора, а также путем анализа x, t -диаграмм.

Соединение деталей измерительного узла между собой осуществлялось при помощи эпоксидной композиции, которая обладает устойчивостью по отношению к хлороформу.

Оптическое волокно, используемое в качестве каналов передачи светового сигнала от узла на фотодетекторы, имеет следующие параметры и характеристики:

- тип волокна кварц-полимерное, многомодовое, ступенчатое;
- диаметр жилы волокна 0,35; 0,65 мм;
- удельные потери световой энергии <50 дБ/км.

Волокна имели гибкую защитную оболочку из прозрачного материала и на узле крепились при помощи держателей – металлических трубочек определенного диаметра.

В каждом опыте рассчитывался объем заливаемой индикаторной жидкости, необходимый для обеспечения требуемой высоты слоя индикатора. Для того чтобы высота слоя индикатора была одной и той же по всей площади, узел устанавливался строго горизонтально.

Результаты экспериментов

Всего был проведен 21 опыт на образцах из стали 12X18H10T. В некоторых опытах удалось зарегистрировать только волну упругой разгрузки, догон фронта УВ в индикаторе фронтом волны объемной разгрузки при анализе полученных осциллограмм не идентифицируется.

Осциллограммы, полученные в опыте при $\sigma_{xx} = 126,5$ ГПа, представлены на рис. 4. Результаты вычислений скоростей звука в ударно-сжатой стали 12X18H10T представлены в табл. 2.

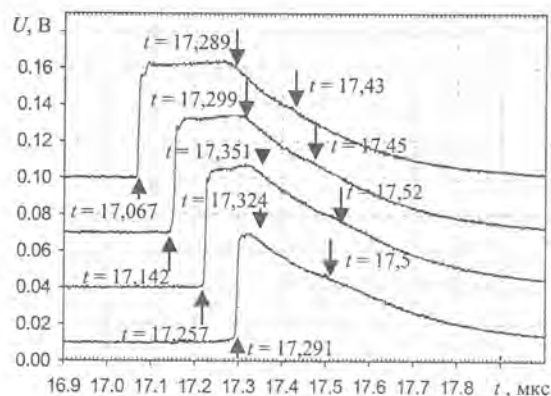


Рис. 4. Осциллограммы взрывного эксперимента по регистрации скоростей звука в стали 12X18H10T при $\sigma_{xx} = 126,5$ ГПа

Параметры состояний в ударно-сжатой стали 12X18H10T

$W_{уд}$, км/с	D , км/с	u , км/с	σ_{xx} расч., ГПа	c_l эксп, км/с	c_b эксп, км/с
2,20	6,21	1,10	54,0	7,59±0,23	–
2,64	6,54	1,32	68,1	7,96±0,24	–
2,64				7,95±0,24	6,92±0,21
2,74	6,62	1,37	71,5	7,97±0,24	7,00±0,21
3,12	6,90	1,56	84,9	7,97±0,24	–
3,12				8,21±0,25	7,39±0,22
3,47	7,16	1,73	98,1	8,31±0,25	–
3,47				8,49±0,25	7,56±0,23
3,71	7,34	1,86	107,5	8,55±0,26	–
3,71				8,66±0,26	7,43±0,22
4,17	7,69	2,09	126,5	8,69±0,26	–
4,17				8,86±0,27	7,87±0,24
4,17				9,04±0,27	7,82±0,24
4,54	7,97	2,27	142,7	8,95±0,27	7,92±0,24
5,55	7,31	1,83	105,8	8,43±0,51	–
4,85	8,13	2,38	152,3	8,98±0,54	8,39±0,50
4,85				9,18±0,55	8,45±0,51
4,85				9,13±0,55	8,06±0,48
5,25	8,43	2,58	171,3	9,51±0,57	–
5,77	8,82	2,84	197,4	9,47±0,57	8,90±0,53
5,84	8,87	2,87	201,0	9,75±0,59	8,76±0,53

Обсуждение результатов

Графическое отображение полученных результатов показано на рис. 5. Там же представлены данные работы [10], полученные при помощи методики манганиновых датчиков (ММД) в диапазоне напряжений 10–55 ГПа. Представлены также начальные состояния для стали 12X18H10T: $c_{l0} = 5,74$ км/с, $c_{b0} = 4,56$ км/с [9].

Относительная погрешность измерений составила [11]:

- $\pm 3\%$ (2σ) для «симметричного удара»;
- $\pm 6\%$ (2σ) для «несимметричного удара».

Зависимость скорости звука можно описать линейной функцией от плотности (закон Берча) [12]. Вся совокупность экспериментальных точек в области γ -фазы ($\sigma_{xx} = 0$ –200 ГПа) была описана единой зависимостью:

$$c_l \text{ (км/с)} = 1,047\rho \text{ (г/см}^3\text{)} - 2,515, \quad (3)$$

$$c_b \text{ (км/с)} = 1,126\rho \text{ (г/см}^3\text{)} - 4,305, \quad (4)$$

где ρ – плотность вещества за фронтом УВ.

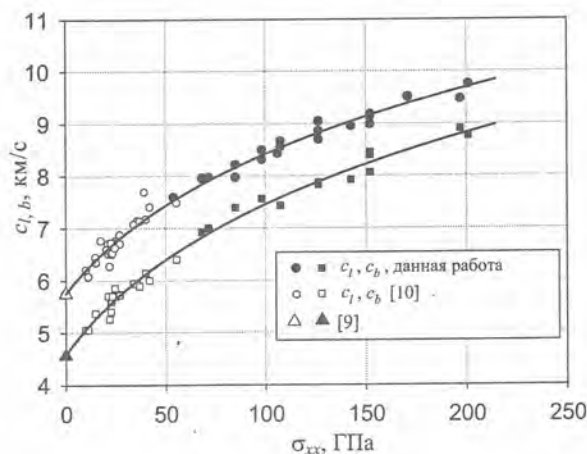


Рис. 5. Зависимости продольной c_l и объемной c_b скоростей звука в ударно-сжатой стали 12X18H10T от напряжения ударного сжатия

В упругопластической области свойства металлов характеризуются пределом текучести Y_D , модулем Юнга E , модулем объемного сжатия K , модулем сдвига G и коэффициентом Пуассона μ . Последние четыре параметра непосредственно в экспериментах с ударными волнами не измеряются, но связаны с регистрируемыми скоростями звука. Из основных соотношений теории упругости следует [9]:

$$K = \rho c_b^2 - \text{модуль объемного сжатия};$$

$$E = \rho c_l^2 \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{1-\nu} - \text{модуль Юнга};$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \rho c_t^2 \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} - \text{модуль сдвига};$$

$$\mu = \frac{3 - \left(\frac{c_l}{c_b}\right)^2}{3 + \left(\frac{c_l}{c_b}\right)^2} - \text{коэффициент Пуассона}.$$

Используя полученные зависимости (3) и (4), были построены зависимости указанных выше параметров, а именно: коэффициента Пуассона μ , модуля Юнга E , модуля объемного сжатия K и модуля сдвига G – от напряжения на фронте УВ. Графическое отображение полученных результатов представлено на рис. 6.

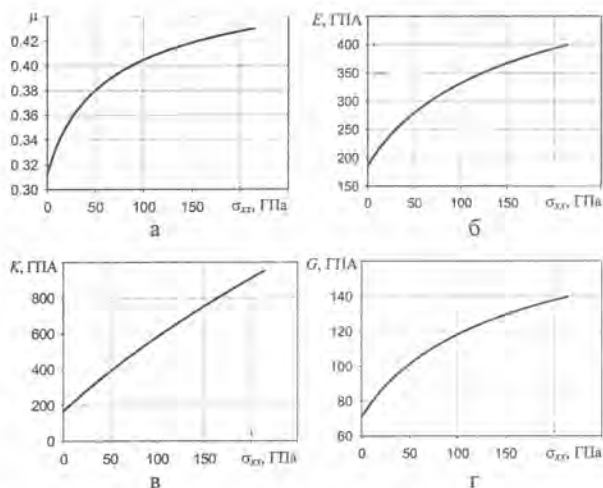


Рис. 6. Зависимость коэффициента Пуассона (а), модуля Юнга (б), модуля объемного сжатия (в) и модуля сдвига (г) от напряжения ударного сжатия в стали 12X18H10T

Заключение

В результате взрывных экспериментов получены следующие результаты по ударно-волновым свойствам нержавеющей стали 12X18H10T:

1. Измерена продольная скорость звука $c_l(\sigma_{xx})$ в интервале напряжений однократного ударного сжатия $50 \leq \sigma_{xx} \leq 200$ ГПа, погрешность измерений $\cong \pm 3\%$ (2σ).

2. Измерена объемная скорость звука $c_b(\sigma_{xx})$ в интервале напряжений однократного ударного сжатия $65 \leq \sigma_{xx} \leq 200$ ГПа, погрешность измерений $\cong \pm 6\%$ (2σ).

3. Получены зависимости модуля Юнга E , модуля объемного сжатия K , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона μ от напряжения на фронте ударной волны в диапазоне $0 \leq \sigma_{xx} \leq 200$ ГПа – области ударно-волнового сжатия аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T в твердой фазе.

Литература

- McQueen R. G., Brown J. M. Phase transitions, Grüneisen parameter, and elasticity for shocked iron between 77 and 400 GPa // J. of Geoph. Res. 1986. Vol. 91, N. B7. P. 7485–7494.
- McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures // Rev. Sci. Instr. 1982. Vol. 53, N 2. P. 245–250.
- Гогуля М. Ф., Воскобойников И. М. Излучение ударно-сжатых галогенопроизводных метана // ФГВ. 1988. Т. 24, № 6. С. 127–134.
- Гогуля М. Ф. Температуры ударного сжатия конденсированных сред. М.: МИФИ, 1988.
- Белякова М. Ю., Жерноклетов М. В. Сутолов Ю. Н., Трунин Р. Ф. Ударное сжатие металлических сплавов // Физика Земли. 1991, № 1.
- Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
- Kozlov E. A. Shock adiabat features, phase transition macrokinetics, and spall fracture of iron in different phase states // High Pressure Research. 1992. Vol. 10. P. 541–582.
- ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные.
- Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: «Янус-К», 1996.
- Вильданов В. Г., Борщевский А. О., Слободенюков В. М. и др. Измерение скорости звука в волне разгрузки в нержавеющей стали 12X18H10T // Сб. тр. Всероссийской научной конфер. молодых ученых и специалистов «Материалы ядерной техники: от фундаментальных исследований к инновационным решениям». Туапсе, 3–7 октября 2006 г.
- Свидетельство о метрологической аттестации МВИ «Определение скорости звука в ударно-сжатых конструкционных материалах при проведении измерений с применением фотоэлектрического комплекса (ФЭК)» № 355 М-НИО-4-2011 от 22.04.2011.
- Shaner J. W., Hixson R. S., Boness D. A. Birch's law for fluid metals. Shock Waves in Condensed Matter, 1987. Elsevier Science Publisher, B.V. P. 135–138.