

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА ЗА ФРОНТОМ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Е.И. Краус, В.М. Фомин, И.И. Шабалин

В работе в рамках единой системы малопараметрического уравнения состояния реализован подход к вычислению механических характеристик веществ за фронтом сильных ударных волн. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов с имеющимися при высоких плотностях энергии экспериментальными данными. Для урана предложена аналитическая аппроксимация коэффициента Пуассона от давления за фронтом ударной волны и определена немонотонная зависимость модуля сдвига от давления и температуры.

Ключевые слова: уравнение состояния; ударные волны; коэффициент Пуассона; модуль сдвига.

Введение

Численное моделирование поведения вещества под действием ударной нагрузки требует учета закономерностей упруго-пластического течения, а следовательно напряжений и деформаций. При решении подобных задач используются уравнения сохранения массы, импульса и энергии. В правой части уравнений движения стоят градиенты компонент тензора напряжений, а на главной диагонали – давление. Если изменение давления легко рассчитывается с помощью уравнения состояния, то изменение девиаторной части тензора напряжений в процессе деформации необходимо определять. Девиаторная часть тензора напряжений зависит от механических характеристик, которые являются функциями давления и температуры. Если упругие свойства материалов в области низких давлений достаточно хорошо исследованы, то для области давлений, реализующейся за фронтом ударной волны, создаются новые и обобщаются существующие модели определения упругих характеристик от давления и температуры. Осложняется эта ситуация еще тем, что до сих пор отсутствуют надежные экспериментальные данные по упругим свойствам в этой области параметров. Отсутствие прямой информации о поведении модуля сдвига в областях высоких давлений может быть в некоторой степени скомпенсировано данными измерений скорости звука за фронтом ударной волны. Настоящая работа является попыткой создания упрощенной методики расчета упругих свойств веществ и сравнение с общепринятыми моделями.

Скорость звука

В работе [1] было создано малопараметрическое уравнение состояния, в котором единственной величиной, характеризующей упругие свойства вещества, является сжимаемость. Она определяет скорость распространения акустических волн сжатия и разрежения, которая, в общем случае, определяется

$$C^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S, \quad (1)$$

где P – давление; ρ – плотность; S – энтропия.

В [2–5] экспериментально показано, что прочностные свойства материала в значительной мере определяют характер и параметры волны разряжения, распространяющейся по

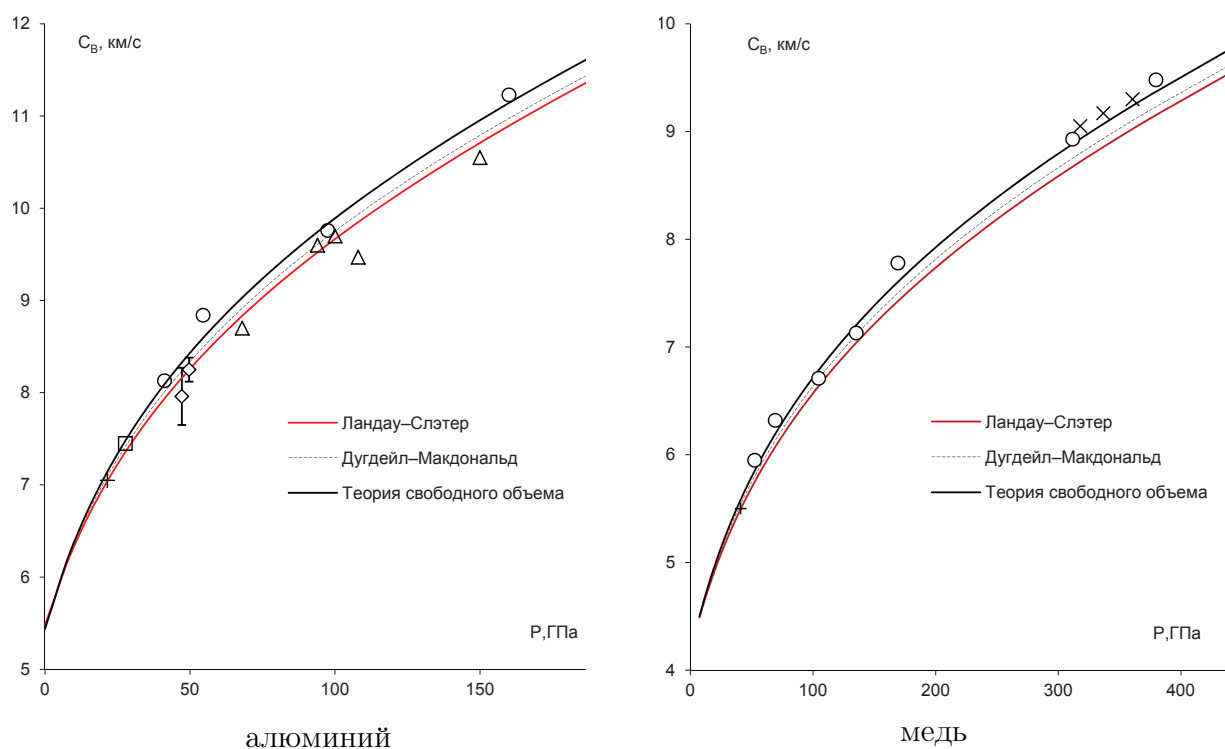


Рис. 1. Зависимость объемной скорости звука от давления вдоль ударной адиабаты экспериментальные данные: ○ – [2], + – [5], ◇ – [9], □ – [10], △ – [11], × – [12]

сжатою ударной волной материалу, и параметры затухания ударных волн. Одним из характеристических свойств твердого тела, отличающим его от жидкости, является устойчивость формы твердого тела, сопротивляемость сдвигу. Тензор напряжений в жидкости диагонален, причем, все три нормальные компоненты его одинаковы и равны давлению, которое изотропно. Известно, что при достаточно больших нагрузках, твердое тело меняет свои упругие свойства и становится пластичным, текучим, в некотором отношении подобным жидкости.

С ростом давления и температуры в импульсе нагрузки изменяются упругие и прочностные характеристики материала. Значения изоэнтропических модулей упругости ударно сжатого вещества определяются из соотношения между измеренными в экспериментах величинами

$$C_B = \sqrt{\frac{K_S}{\rho}} \quad C_L = \sqrt{\frac{K_S + 4/3G}{\rho}}, \tag{2}$$

где C_B – объемная и C_L – продольная скорость звука; K_S – изоэнтропический модуль объемного сжатия; G – модуль сдвига.

Для вычисления объемной скорости звука воспользуемся определением (2), в котором изоэнтропический модуль объемного сжатия вычислялся с помощью уравнения состояния (УРС) из термодинамического тождества

$$K_S = V \left[\frac{T}{c_v} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V^2 - \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \right], \tag{3}$$

где T – температура и c_v – теплоемкость при постоянном объеме.

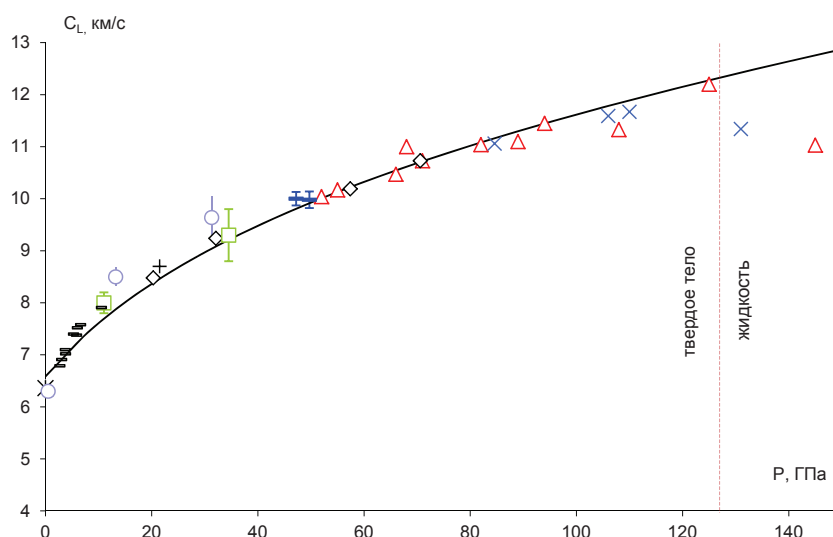


Рис. 2. Продольная скорость звука вдоль адиабаты алюминия; экспериментальные данные: + – [5], – [9], Δ – [11], \bigcirc – [14, 15], \square – [16], – [17], \times – [18], \diamond – [19]

Результаты расчета объемной скорости звука по УРС [1] с применением различных квантово-механических моделей описания коэффициента Грюнейзена [6–8], экспериментальные данные [2, 5, 9–12] представлены на рис. 1 для меди и алюминия. Эти материалы были выбраны из-за наличия большего числа экспериментальных данных, и, кроме того, при ударном сжатии этих металлов вплоть до плавления не отмечено наличие полиморфных превращений. Из сравнения результатов для меди, наиболее точной из рассмотренных теорий, оказалась теория свободного объема [8]. Из-за разброса экспериментальных данных для алюминия, ни одна из теорий не показала решающего преимущества. Все три теории описания коэффициента Грюнейзена показали результат в пределах погрешности. Отличие в предсказании величины объемной скорости звука, с помощью малопараметрического УРС [1], не превысило 5% в рассмотренном диапазоне параметров. Поэтому для вычисления продольной скорости звука воспользуемся предпосылками наиболее простой квантово-механической теории Ландау – Слэтера [6], согласно которой коэффициент Пуассона остается величиной постоянной при изменении давления. Тогда продольную скорость звука можно вычислить из соотношения

$$\frac{C_B}{C_L} = \sqrt{\frac{1 + \mu}{3(1 - \mu)}}. \quad (4)$$

Вычисленная продольная скорость звука алюминия и экспериментальные данные: чистый алюминий [9], алюминиевый сплав Al-2024 [11, 13–17] и алюминиевый сплав LY12 [18, 19] представлены на рис. 2. Согласно работе [20], в которой указывается, что с ростом давления происходит нивелирование различий в сопротивлении пластической деформации разных сплавов алюминия, не будем делать различия между технически чистым алюминием и сплавами алюминия и объединим их одним названием алюминий. Расчет продольной скорости звука показывает высокую точность, погрешность вычисления не превышает 5–7% в области давлений менее 125 ГПа. Проблемной для УРС является область давлений более $P = 125$ ГПа, которая соответствует плавлению алюминия в ударной волне. В жидкости отсутствует сопротивление по отношению к сдвигу, поэтому скорость распространения воз-

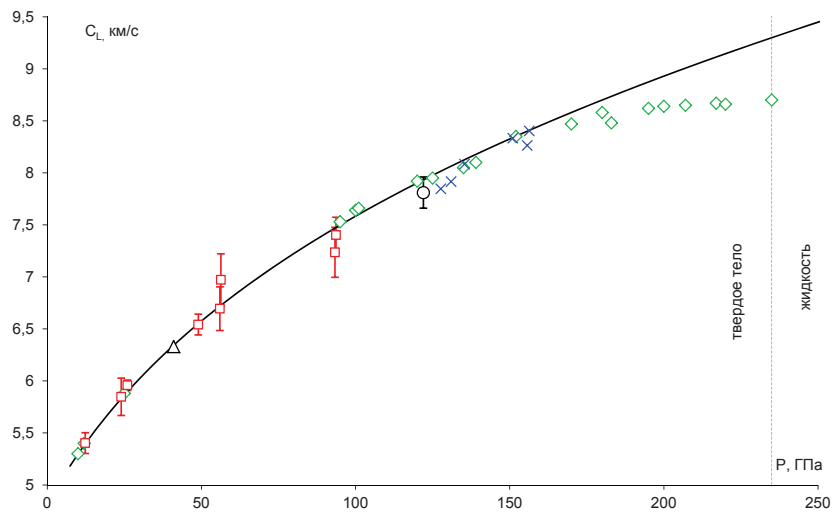


Рис. 3. Продольная скорость звука вдоль адиабаты меди; экспериментальные данные: \circ – [4], \triangle – [5], \diamond – [12], \square – [21], \times – [22]

мощностей становится равным объемной скорости звука, а не продольной, и это фиксирует эксперимент.

На рис. 3 представлен результат расчета продольной скорости звука для меди и экспериментальные данные из [4,5,21,22]. Расчет показывает завышенное значение скорости звука при больших давлениях, но даже в точке плавления $P = 235$ погрешность не превышает 15%.

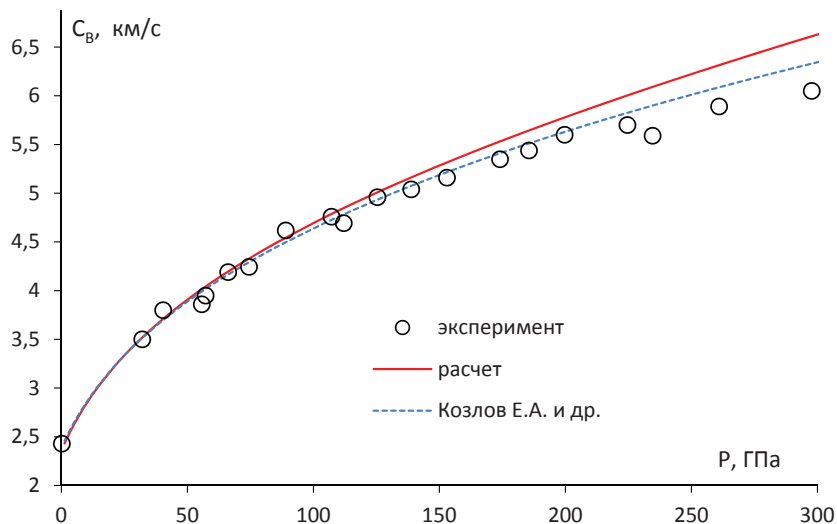


Рис. 4. Зависимость объемной скорости звука вдоль ударной адиабаты урана; экспериментальные данные [23]

Результаты расчета объемной скорости звука урана по разным квантово-механическим моделям [6–8] представлены на рис. 4. Если для Al и Cu значения по различным квантово-механическим моделям разнятся, то для урана все теории дают одинаковые значения. Так

же на рисунок нанесена кривая (штриховая линия) из [23], описывающая экспериментальные данные до $P=160$ ГПа с максимальной точностью $C_B(km/s) = 0,318 \times \rho(g/cm^3) - 3,666$. Расчет объемной скорости звука по УРС находится в согласии с экспериментом до давлений порядка 160 ГПа, т.е. до области, где начинается плавление в ударной волне урана. При больших значениях расчет показывает завышенные значения скорости звука.

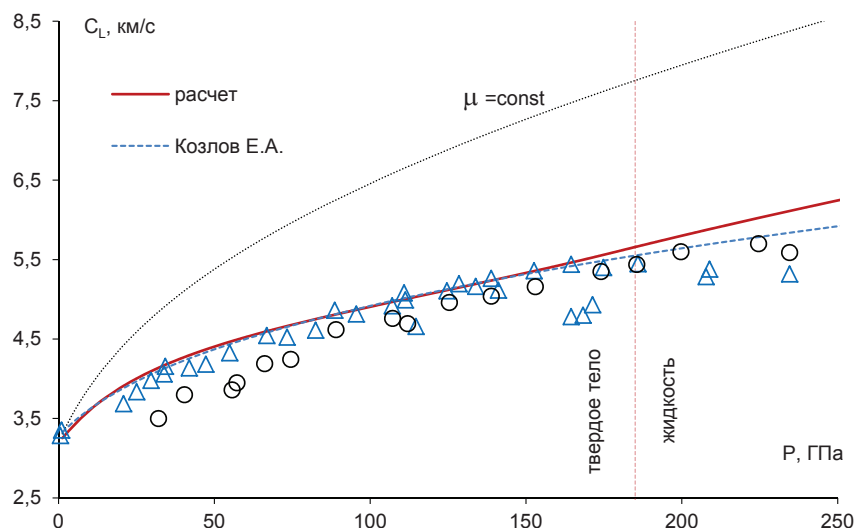


Рис. 5. Продольная скорость звука вдоль адиабаты урана; эксперимент: Δ – C_L [23], \circ – C_B [23]

Коэффициент Пуассона

Для вычисления продольной скорости звука алюминия и меди в [24], успешно использовалась теория Ландау – Слэтера. Однако, согласно экспериментальным данным [26], коэффициент Пуассона монотонно увеличивается с увеличением давления от начального значения до значения несжимаемой жидкости – $\mu = 0,5$, а это в работе не учитывалось. Поэтому для урана будем использовать квантово-механические теории такие, как [7, 8], в которых коэффициент Пуассона увеличивается при увеличении давления.

Обработка экспериментальных данных [23] по ударному нагружению урана показала, что наилучшее описание поведения коэффициента Пуассона достигается при использовании следующей аппроксимации

$$\mu = \mu_0 + b \sqrt{1 - \left(\frac{P - P_{melt}}{a} \right)^2}, \quad (5)$$

где P_{melt} – давление, при котором происходит плавление вещества при ударном воздействии, μ_0 – начальное значение коэффициента Пуассона, a и b – параметры материала, которые вычисляются из условий непрерывности коэффициента Пуассона и его производной в точке плавления.

Расчет продольной скорости звука, с учетом изменения коэффициента Пуассона (5), приведен на рис. 5. Расчет соответствует экспериментальным данным, собранным в работе [23] (точность менее 5%, вплоть до начала плавления). При давлениях более 160 ГПа,

расчет показывает завышенное значение относительно экспериментальных данных (на рисунке нанесены экспериментальные данные объемной скорости звука C_B , значения которой больше, чем значения продольной скорости C_L в этой области, а значит к этим данным необходимо относится критически). Штриховой линией на рисунок нанесен расчет аппроксимирующей экспериментальной кривой из [23], значение которой рассчитывались по формуле $C_L(km/s) = 0.232 \times \rho(g/cm^3) - 1,41$. Теория Ландау – Слэтера дает завышенное значение скорости (на рисунке линия $\mu = \text{const}$).

Модуль сдвига

Согласно теории упругости [25], в случае однородного изотропного тела модули упругости одинаковы по всем направлениям. Четыре упругие характеристики E – модуль Юнга, G – модуль сдвига, K_S – изоэнтропический модуль объемного сжатия и μ – коэффициент Пуассона взаимосвязаны между собой. Ни одна из них непосредственно в ударно-волновых экспериментах не измеряется. Каждая из этих характеристик выражается через упругую продольную и объемную скорости звука [26]. Все упругие свойства гомогенных изотропных линейно-упругих материалов уникально определяются любыми двумя модулями упругости, остальные можно вычислить по формулам теории упругости. В работе [24] показано, что один из модулей упругости, а именно изоэнтропический модуль объемного сжатия, определяется с высокой степенью точности с помощью УРС. В качестве второй упругой характеристики рассмотрим модуль сдвига.

Экспериментально было показано, см., например, [4, 27], что модуль сдвига возрастает с увеличением давления и уменьшается с ростом температуры. В ударной волне одновременно увеличиваются как давление, так и температура, а, следовательно, не однозначно, как эти конкурирующие процессы влияют на модуль сдвига. На сегодняшний день известно множество моделей описания модуля сдвига от давления и температуры, наиболее известные из них MTS (mechanical threshold stress) [28, 29], модель Стейнберга – Кохрана – Гуинана (SCG) [30, 31], модель Nadal – LePoac [32], модель Бураковского – Престона (BP) [33, 34], (V, T) – модель [35] и др. Эти модели успешно опробованы на практике, показывая приемлемую точность при вычислении модуля сдвига. Однако эти модели обладают одним существенным недостатком – они требуют знание дополнительных специфических констант, большинство из которых определяются эмпирическим способом. Поэтому если значения этих специфических констант моделей для вещества не известны, то использование этих моделей ограничено. Так, например, для урана константы для представленных моделей не найдены.

Подобный подход полностью противоречит философии созданного малопараметрического УРС [1]. Опираясь на тот факт, что точность вычисления объемной и продольной скоростей звука достаточно высокая, вычислим модуль сдвига из разницы скоростей

$$G = \frac{3}{4} \frac{(C_L^2 - C_B^2)}{V}. \quad (6)$$

На рис. 6 представлены результаты расчетов модуля сдвига алюминия, а также расчеты по моделям SCG, BP и экспериментальные точки [16, 18, 19, 36, 37]. Константы для модели Стейнберга брались из [30], а для модели Бураковского из [38]. Авторское решение отличается от моделей BP и SCG. Выполненный авторский расчет хоть и попадает в отведенный экспериментальный интервал, показывает тенденцию к завышению модуля сдвига при давлениях более 125 ГПа. Из рисунка видно, что все модели, в том числе и авторская, имеют один недостаток – не учитывают поведение модуля сдвига вблизи точки плавления. При такой постановке задачи (квантово-механический подход Ландау – Слэтера), плавление можно учесть только с помощью разрывной функции в точке плавления.

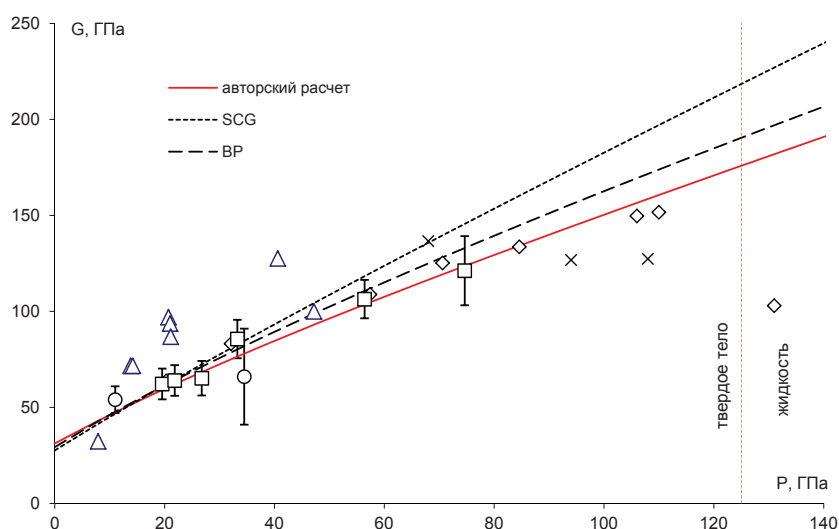


Рис. 6. Модуль сдвига на ударной адиабате алюминия; экспериментальные данные: \times – [11], \circ – [16], \diamond – [18, 19], \square – [36], \triangle – [37]

На рис. 7 представлен расчет модуля сдвига урана при условии, что коэффициент Пуассона – монотонно возрастающая функция вплоть до температуры плавления (5). Расчет коэффициента Пуассона вдоль ударной адиабаты урана ($P_{melt} = 185$ ГПа, $a = 196,23$, $b = 0,36$) представлен на этом же графике (штриховая линия, ось справа). Предложенное поведение коэффициента Пуассона учитывает, что при плавлении механизм распространения акустических возмущений меняется и материал в дальнейшем не сопротивляется изменению формы.

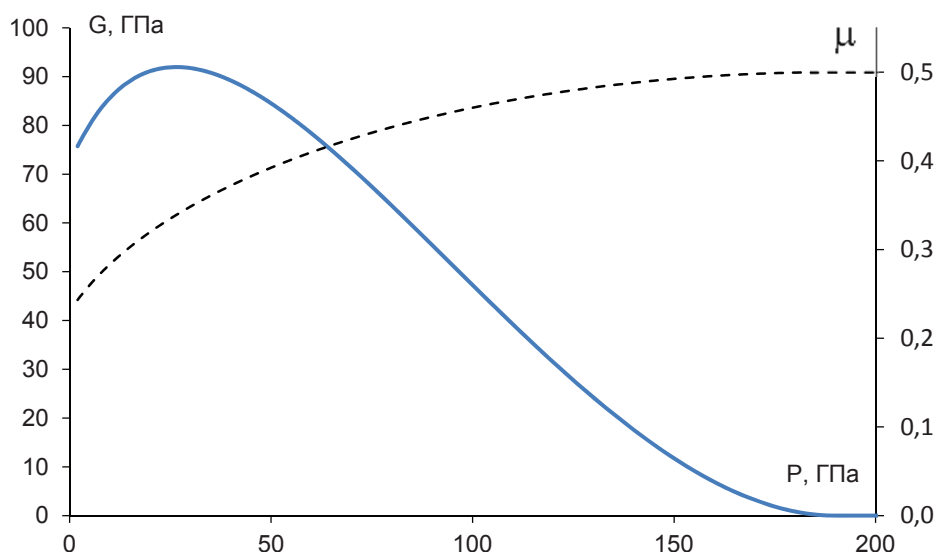


Рис. 7. Модуль сдвига и коэффициент Пуассона вдоль ударной адиабаты урана

Отсутствие прямых экспериментальных данных по модулю сдвига урана не позволяет определить истинность расчета. Однако, взяв на вооружение тот факт, что экспериментально достаточно сложно измерить модуль сдвига прямыми методами (используют косвенные методы, т.е. измеряют продольные и объемные скорости звука), можно утверждать,

что определяющим показателем точности расчета модуля сдвига является точность расчета обеих скоростей звука одновременно. А как показано выше, точность вычисления скоростей звука по малопараметрическому УРС достаточно высокая.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН (ПИП № 64) и РФФИ (№ 13-08-01218).

Литература

1. Краус, Е.И. Малопараметрическое уравнение состояния твердого вещества при высоких плотностях энергии / Е.И. Краус // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2007. – Т. 2, вып. 2. – С. 65–73.
2. Изэнтропическая сжимаемость алюминия, меди, свинца и железа при высоких давлениях / Л.В. Альтшулер, С.Б. Кормер, М.И. Бражник, Л.А. Владимиров // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1960. – Т. 38, № 4. – С. 1061–1073.
3. Воробьев, А.А. Зависимость коэффициентов упругости алюминия от степени сжатия в ударной волне / А.А. Воробьев, А.Н. Дремин, Г.И. Канель // Прикладная механика и техническая физика. – 1974. – № 5. – С. 94–100.
4. Альтшулер, Л.В. Прочность и упругость железа и меди при высоких давлениях ударного сжатия / Л.В. Альтшулер, М.И. Бражник, Г.С. Телегин // Прикладная механика и техническая физика. – 1971. – № 6. – С. 159–166.
5. Альтшулер, Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений / Л.В. Альтшулер // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 85, вып. 2. – С. 197–258.
6. Ландау, Л.Д. Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ / Л.Д. Ландау, К.П. Станюкович // ДАН СССР. – 1945. – Т. 46. – С. 399–406.
7. Dugdale, J.S. The Thermal Expansion of Solids / J.S. Dugdale, D. McDonald // Phys. Rev. – 1953. – V. 89, № 4. – P. 832–851.
8. Зубарев, В.Н. О коэффициенте Грюнайзена / В.Н. Зубарев, В.Я. Ващенко // Физика твердого тела. – 1963. – Т. 5, вып. 3. – С. 886–891.
9. High Pressure Strength of Shocked Aluminum / J.R. Asay, L.C. Chhabildas, G.I. Kerley, T.G. Trucano // Shock Waves in Condensed Matter / Eds. Y.M. Gupta. – N.-Y.: American Institute of Physics, 1985. – P. 145–149.
10. Neal, T. Mach Waves and Reflected Rarefactions in Aluminum / T. Neal // J. Appl. Phys. – 1976. – V. 46, № 6. – P. 2521–2527.
11. McQueen, R.G. The Velocity of Sound Behind Strong Shock Waves in 2024 Al / R.G. McQueen, J.N. Fritz, C.E. Morris // Shock Waves in Condensed Matter / Eds. J.R. Asay, R.A. Graham, G.K. Straub. – Amsterdam: North Holland, 1984. – P. 95–98.
12. Hayes, D. High Pressure Elastic Properties, Solid-Liquid Phase Boundary and Liquid Equation of State from Release Wave Measurements in Shock-Loaded Copper // Shock Compression of Condensed Matter / D. Hayes, R.S. Hixson, R.G. McQueen / Eds. Furnish M.D., Chhabildas L.C., Hixson R.S. – N.-Y.: American Institute of Physics, 2000. – P. 483–488.
13. LASL Shock Hugoniot Data / Ed. S.P. Marsh. – Berkeley etc.: Univ. California Press, 1980. – 658 p.
14. Kusubov, A.S. Measurement of Elastic and Plastic Unloading Wave Profiles in 2024-T4 Aluminum Alloy / A.S. Kusubov, M. van Thiel // J. Appl. Phys. – 1969. – V. 40, № 9. – P. 3776–3779.

15. Kusubov, A.S. Dynamic Yield Strength of 2024-T4 Aluminum at 313 kbar // A.S. Kusubov, M. van Thiel // *J. Appl. Phys.* – 1969. – V. 40, № 2. – P. 893–898.
16. Erkman, J.O. Attenuation of Shock Waves in Aluminum / J.O. Erkman, A.B. Christensen // *J. Appl. Phys.* – 1967. – V. 38, № 13. – P. 5395–5403.
17. Yaziv, D. Variation of the Elastic Constants of 2024-T351 Al under Dynamic Pressures / D. Yaziv, Z. Rosenberg, Y. Partom // *J. Appl. Phys.* – 1982. – V. 53, № 1. – P. 353–355.
18. Shear Modulus of Shock-Compressed LY12 Aluminum up to Melting Point / Yu Yu-Ying et al. // *Chinese Phys. B.* – 2008. – V. 17, № 1. – P. 264–269.
19. Sound Velocity and Release Behavior of Shock-Compressed LY12-Al / Yu Yu-Ying et al. // *Chinese Phys. Lett.* – 2005. – V. 22, № 7. – P. 1742–1745.
20. Глушак, Б.Л. Определяющее уравнение Al и Mg для описания высокоскоростного деформирования УВ / Б.Л. Глушак, С.А. Новиков, Ю.В. Батьков // *Физика горения и взрыва.* – 1992. – № 1. – С. 84–89.
21. Chhabildas, L.C. Time-Resolved Wave Profile Measurements in Copper to Megabar Pressures / L.C. Chhabildas, J.R. Asay // *High pressure in research and industry, 8th AIRAPT Conf / Eds. C.M. Backman, T. Johansson, L. Tegner.* – Uppsala, 1981. – P. 183–189.
22. Hu, J.B. Sound Velocities at High Pressures and Shock – Melting of Copper / J.B. Hu, F.Q. Jing, J.X. Cheng // *Chinese Journal of High Pressure Physics.* – 1989. – V. 3. – P. 187–197.
23. Sound Velocities and Shear Strength of Shocked U within 10–250 GPa / E.A. Kozlov, D.G. Pankratov, O.V. Tkachyov, A.K. Yakunin // *Book of Abstracts «19th European Conference on Fracture» (Kazan, August 26–31, 2012).* – Kazan, 2012. – P. 146.
24. Краус, Е.И. Расчет модулей упругости металлов за фронтом сильных ударных волн / Е.И. Краус // *Вестник НГУ. Серия: Физика.* – 2009. – Т. 4, вып. 4. – С. 79–90.
25. Новожилов, В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – Л.: Судпродгиз, 1958. – 370 с.
26. Глушак, Б.Л. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках / Б.Л. Глушак, В.Ф. Куропатенко, С.А. Новиков. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 295 с.
27. Abey, A.E. Effect of Hydrostatic Pressure on the Stress-Strain Curves of OFHC Copper / A.E. Abey // *J. Appl. Phys.* – 1971. – V. 42, № 10. – P. 4085–4088.
28. Chen, S.R. Constitutive Behavior of Tantalum and Tantalum-Tungsten Alloys / S.R. Chen, G.T. Gray // *Metall. Mater. Trans.* – 1996. – V. 27, № 10. – P. 2994–3006.
29. Anisotropy Corrected MTS Constitutive Strength Modeling in HY-100 Steel / D.M. Goto, J.F. Bingert, W.R. Reed, R.K. Garrett // *Scripta Mater.* – 2000. – V. 42, № 12. – P. 1125–1131.
30. Steinberg, D.J. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate / D.J. Steinberg, S.G. Cochran, M.W. Guinan // *J. Appl. Phys.* – 1980. – V. 51, № 3. – P. 1498–1504.
31. Steinberg, D.J. A Constitutive Model for Strain Rate from 10^{-4} to 10^{-6}s^{-1} / D.J. Steinberg, C.M. Lund // *J. Appl. Phys.* – 1989. – V. 65, № 4. – P. 1528–1533.
32. Nadal, M.H. Continuous Model for the Shear Modulus as a Function of Pressure and Temperature up to the Melting Point: Analysis and Ultrasonic Validation / M.H. Nadal, P. Le Poac // *J. Appl. Phys.* – 2003. – V. 93, № 5. – P. 2472–2480.
33. Burakovsky, L. Analytic Model of the Shear Modulus at All Temperatures and Densities / L. Burakovsky, C.W. Greeff, D.L. Preston // *Phys. Rev. B.* – 2003. – V. 67, № 9. – id.094107.

34. Burakovsky, L. Shear Modulus at All Pressures: Generalized Guinan – Steinberg Formula / L. Burakovsky, D.L. Preston // J. Phys. Chem. Solids. – 2006. – V. 67, No 9–10. – P. 1930–1936.
35. Елькин, В.М. Полуэмпирические модели модуля сдвига в широком диапазоне температур и давлений ударного сжатия / В.М. Елькин, В.Н. Михайлов, Т.Ю. Михайлова // Физика металлов и металловедение. – 2011. – С. 563–576.
36. Effect of Anneal on the Release Behaviour of LY12-Al Alloy / Hu Jian-Bo, Yu Yu-Ying, Tan Hua, Dai Cheng-Da // Chinese Phys. Lett. – 2006. – V. 23, № 5. – P. 1265–1268.
37. Jianxiang Peng Pressure and Temperature Dependence of Shear Modulus and Yield Strength for Aluminum, Copper, and Tungsten under Shock Compression / Jianxiang Peng, Fuqian Jing, Dahong Li // J. Appl. Phys. – 2005. – V. 98, № 1. – id. 013508.
38. Burakovsky, L. Generalized Guinan-Steinberg Formula for the Shear Modulus at All Pressures / L. Burakovsky, D.L. Preston // Phys. Rev. B. – 2005. – V. 71, № 18. – id. 184118.

Евгений Иванович Краус, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией «Термомеханика и прочность новых материалов», Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск, Российская Федерация), kraus@itam.nsc.ru.

Василий Михайлович Фомин, академик, профессор, директор, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск, Российская Федерация), fomin@itam.nsc.ru.

Иван Иванович Шабалин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Физика быстропротекающих процессов», Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск, Российская Федерация), shabalin@itam.nsc.ru.

Bulletin of the South Ural State University.
Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software",
2014, vol. 7, no. 1, pp. 49–61.

MSC 74D10

DOI: 10.14529/mmp140105

Calculation of Shear Modulus Behind Shock Wave

E.I. Kraus, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russian Federation, kraus@itam.nsc.ru,

V.M. Fomin, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russian Federation, fomin@itam.nsc.ru,

I.I. Shabalin, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russian Federation, shabalin@itam.nsc.ru

The authors implement the approach of calculation of mechanical characteristics of substances behind the front of strong shock waves in a consolidated system of few-parameter equation of state. The results are compared with available theoretical calculations and experimental data. For uranium the authors provide an analytical approximation of the Poisson ratio of the pressure behind the shock wave and determined non-monotonic dependence of the shear modulus on the pressure and temperature.

Keywords: the equation of state; shock waves; Poisson's ratio; shear modulus.

References

1. Kraus E.I. Few-parameter Equation of State Solid at High Energy Density [Maloparametricheskoe uravnenie sostoyaniya tverdogo veshstva pri vysokih plotnostyah energii]. *Vestnik NGU*, 2007, no. 2, vol. 2, pp. 65–73.
2. Al'tshuler L.V., Kormer S.B., Brazhnik M.I., Vladimirov L.A. Isentropic Compressibility of Aluminum, Copper, Lead And Iron at High Pressures [Ize'ntropicheskaya szhimaemost' alyuminiya, medi, svintsa i zheleza pri vysokih davleniyah]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1960, vol. 38, no. 4, pp. 1061–1073.
3. Vorob'ev A.A., Dremin A.N., Kanel' G.I. The Shock Compression Ratio Dependence of the Aluminum Elastic Modulus [Zavisimost' koeffitsientov uprugosti alyuminiya ot stepeni szhatiya v udarnoy volne]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1974, no. 5, pp. 94–100.
4. Al'tshuler L.V., Brazhnik M.I., Telegin G.S. Strength and Elasticity of Iron and Copper at High Shock-Wave Compression Pressures [Prochnost' i uprugost' zheleza i medi pri vysokih davleniyah udarnogo szhatiya]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1971, no. 6, pp. 159–166.
5. Al'tshuler L.V. Application of Shock Waves in High-Pressure Physics [Primenenie udarnykh voln v fizike vysokih davleniy]. *Advances in Physical Sciences*, 1965, vol. 85, issue 2, pp. 197–258.
6. Landau L.D., Stanyukovich K.P. On the Study of Detonation of Condensed Explosives [Ob izuchenii detonatsii kondensirovannykh vzryvchatykh veshchestv]. *Dokl. AN SSSR*, 1945, vol. 46, pp. 399–406.
7. Dugdale J.S., McDonald D. The Thermal Expansion of Solids. *Phys. Rev.*, 1953, vol. 89, no. 4, pp. 832–851. DOI: 10.1103/PhysRev.89.832
8. Zubarev V.N., Vaschenko V.Ya. About the Grüneisen Coefficient [O koeffitsiente Gryunayzena], *Fizika Tverdogo Tela* [Soviet Physics, Solid State], 1963, vol. 5, issue 3, pp. 886–891.
9. Asay J.R., Chhabildas L.C., Kerley G.I., Trucano T.G. High Pressure Strength of Shocked Aluminum. *Shock Waves in Condensed Matter*, N.-Y., American Institute of Physics, 1985, pp. 145–149.
10. Neal T. Mach Waves and Reflected Rarefactions in Aluminum. *J. Appl. Phys.*, 1976, vol. 46, no. 6, pp. 2521–2527. DOI: 10.1063/1.321928
11. McQueen R.G., Fritz J.N., Morris C.E. The Velocity of Sound Behind Strong Shock Waves in 2024 Al. *Shock Waves in Condensed Matter*, 1984, pp. 95–98.
12. Hayes D, Hixson R.S., McQueen R.G. High Pressure Elastic Properties, Solid-Liquid Phase Boundary and Liquid Equation of State From Release Wave Measurements in Shock-Loaded Copper. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2000, pp. 483–488.
13. LASL Shock Hugoniot Data, 1980, 658 p.
14. Kusubov A.S., van Thiel M. Measurement of Elastic and Plastic Unloading Wave Profiles in 2024-T4 Aluminum Alloy. *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, no. 9, pp. 3776–3779. DOI: 10.1063/1.1658271
15. Kusubov A.S., van Thiel M. Dynamic Yield Strength of 2024-T4 Aluminum at 313 kbar. *J. Appl. Phys.*, 1969, vol. 40, no. 2, pp. 893–898. DOI: 10.1063/1.1657482
16. Erkman J.O., Christensen A.B. Attenuation of Shock Waves in Aluminum. *J. Appl. Phys.*, 1967, vol. 38, no. 13, pp. 5395–5403. DOI: 10.1063/1.1709331

17. Yaziv D., Rosenberg Z., Partom Y. Variation of the Elastic Constants of 2024-T351 Al Under Dynamic Pressures. *J. Appl. Phys.*, 1982, vol. 53, no. 1, pp. 353–355. DOI: 10.1063/1.329895
18. Yu Yu-Ying et al. Shear Modulus of Shock-Compressed LY12 Aluminum up to Melting Point. *Chinese Phys. B.*, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 264–269. DOI: 10.1088/1674-1056/17/1/046
19. Yu Yu-Ying et al. Sound Velocity and Release Behavior of Shock-Compressed LY12-Al. *Chinese Phys. Lett.*, 2005, vol. 22, no. 7, pp. 1742–1745. DOI: 10.1088/0256-307X/22/7/050
20. Glushak B.L., Novikov S.A., Bat'kov Yu.V. Constitutive Equation for Describing High Strain Rates of Al and Mg in a Shock Wave [Opredelyayushee uravnenie Al i Mg dlya opisaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya UV]. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 1992, no. 1, pp. 84–89.
21. Chhabildas L.C., Asay J.R. Time-Resolved Wave Profile Measurements in Copper To Megabar Pressures. *High Pressure in Research and Industry*, 8th AIRAPT Conf., 1981, pp. 183–189.
22. Hu J.B., Jing F.Q., Cheng J.X. Sound Velocities at High Pressures and Shock-Melting Of Copper. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1989, vol. 3, pp. 187–197.
23. Kozlov E.A., Pankratov D.G., Tkachyov O.V., Yakunin A.K. Sound Velocities and Shear Strength of Shocked U within 10-250 GPa. *Book of Abstracts 19th European Conference on Fracture*, 2012, pp. 146.
24. Kraus E.I. The Calculation of the Elastic Moduli of Metal Behind a Strong Shock Wave [Raschet moduley uprugosti metallov za frontom sil'nyh udarnykh voln]. *Vestnik NGU*, 2009, vol. 4, no.4, pp. 79–90.
25. Novozhilov V.V. *Teoriya uprugosti* [Theory of Elasticity]. Leningrad, Sudprodgiz, 1958, 370 p.
26. Glushak B.L., Kuropatenko V.F., Novikov S.A. *Issledovanie prochnosti materialov pri dinamicheskikh nagruzkah* [Investigation of the Strength of Materials Under Dynamic Loads], 1992. 295 p.
27. Abey A.E. Effect of Hydrostatic Pressure on the Stress-Strain Curves of OFHC Copper. *J. Appl. Phys.*, 1971, vol. 42, no. 10, pp. 4085–4088. DOI: 10.1063/1.1659730
28. Chen S.R., Gray G.T. Constitutive Behavior of Tantalum And Tantalum-Tungsten Alloys. *Metall. Mater. Trans.*, 1996, vol. 27, no. 10, pp. 2994–3006. DOI: 10.1007/BF02663849
29. Goto D.M., Bingert J.F., Reed W.R., Garrett R.K. Anisotropy Corrected MTS Constitutive Strength Modeling in HY-100 Steel. *Scripta Mater.*, 2000, vol. 42, no. 12, pp. 1125–1131. DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00347-X
30. Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W. A Constitutive Model for Metals Applicable at High-Strain Rate. *J. Appl. Phys.*, 1980, vol. 51, no. 3, pp. 1498–1504. DOI: 10.1063/1.327799
31. Steinberg D.J., Lund C.M. A Constitutive Model for Strain Rate from 10^{-4} to 10^{-6}s^{-1} . *J. Appl. Phys.*, 1989, vol. 65, no. 4, pp. 1528–1533. DOI: 10.1063/1.342968
32. Nadal M.H., Le Poac P. Continuous Model for The Shear Modulus as a Function of Pressure and Temperature Up to the Melting Point: Analysis and Ultrasonic Validation. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, no. 5, pp. 2472–2480. DOI: 10.1063/1.1539913
33. Burakovsky L., Greeff C.W., Preston D.L. Analytic Model of the Shear Modulus at All Temperatures and Densities. *Phys. Rev. B.*, 2003, vol. 67, no. 9, id.094107. DOI: 10.1103/PhysRevB.67.094107
34. Burakovsky L., Preston D.L. Shear Modulus at All Pressures: Generalized Guinan–Steinberg Formula. *J. Phys. Chem. Solids.*, 2006, vol. 67, no. 9–10, pp. 1930–1936. DOI: 10.1016/j.jpcs.2006.05.041

35. El'kin V.M., Mihaylov V.N, Mihaylova T. Yu. Semi-Empirical Model of the Shear Modulus in a Wide Range of Temperatures and Pressures of Shock Compression [Poluempiricheskie modeli modulya sdviga v shirokom diapazone temperatur i davleniy udarnogo szhatiya]. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, pp. 563–576.
36. Hu Jian-Bo, Yu Yu-Ying, Tan Hua, Dai Cheng-Da Effect of Anneal on the Release Behaviour of LY12-Al Alloy. *Chinese Phys. Lett.*, 2006, vol. 23, no. 5, pp. 1265–1268. DOI: 10.1088/0256-307X/23/5/055
37. Jianxiang Peng, Fuqian Jing, Dahong Li. Pressure and Temperature Dependence of Shear Modulus and Yield Strength for Aluminum, Copper, and Tungsten Under Shock Compression. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, no. 1, id. 013508. DOI: 10.1063/1.1943510
38. Burakovsky L., Preston D.L. Generalized Guinan-Steinberg Formula for the Shear Modulus at All Pressures. *Phys. Rev. B.*, 2005, vol. 71, no. 18, id. 184118. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.184118

Поступила в редакцию 7 декабря 2013 г.