

05.1

© 1991

## О КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Е.Г. Ф а т е е в, В.П. Х а н

Эффект реологического взрыва (РВ) – это, как известно [1], взрывоподобное разрушение хрупкого твердого тела во всем его объеме в критических полях механических напряжений, возникающих при медленных нагружениях ( $\omega \sim 10^{-3} - 10^{-1}$  ГПа/с) в открытых системах сжатия. Характерные времена нагружения системы с наковальнями Бриджмена до возбуждения РВ и времена процессов импульсного сжатия образца между наковальнями порядка  $\sim 10^2$  с и  $\sim 10^{-5}$  с соответственно [2]. РВ сопровождается аномально быстрым течением материала и его выбросом из-под наковален со скоростями  $\sim 1$  км/с, ударной волной с сильным звуковым щелчком и импульсом электромагнитных волн вплоть до рентгеновских [1, 2]. Известно, что критическое давление РВ между наковальнями имеет зависимость от толщины образца [3] и от природы материала [1–4]. В экспериментах с РВ иногда отмечают зависимость критического давления от скорости нагружения, но характер ее не установлен. Методическая трудность исследования температурной зависимости критического давления  $P_{кр}$  породила гипотезу об отсутствии ее для РВ [3, 5]. Однако, принимая во внимание твердо установленный факт, что возбуждение РВ инициируется процессами разрушения [2, 4], очевидно можно предполагать температурную зависимость и для критического давления РВ по аналогии с подобными зависимостями, установленными для классических разрушений при растяжении стержней [6]. Поэтому целью настоящей работы является первое прямое экспериментальное исследование зависимости критического давления РВ от температуры и скорости нагружения. Отметим здесь, что для возбуждения РВ скорость нагружения должна быть в  $\sim 10^5 - 10^6$  раз меньше, чем в экспериментах по ударно-волновому нагружению [1, 2].

Эксперименты проводились для каждого исследуемого вещества при фиксированном значении предвзрывной толщины образца между наковальнями, составлявшего  $\approx 0.7$  мм. Нами использовались наковальни Бриджмена, изготовленные из твердого сплава ВК-8 с диаметром рабочей поверхности 5 мм в аппаратуре высокого давления по методике, описанной в [2]. В качестве модельных веществ использовались поликристаллические образцы  $Se$ ,  $S$ ,  $NH_4Cl$  и  $FeSO_4 \cdot 7(H_2O)$ . Вещества выбраны, исходя из возможности возбуждения в них РВ во всем диапазоне доступных в эксперименте температур и давлений. А такие вещества, как  $Si$  и  $Ge$ , к примеру,

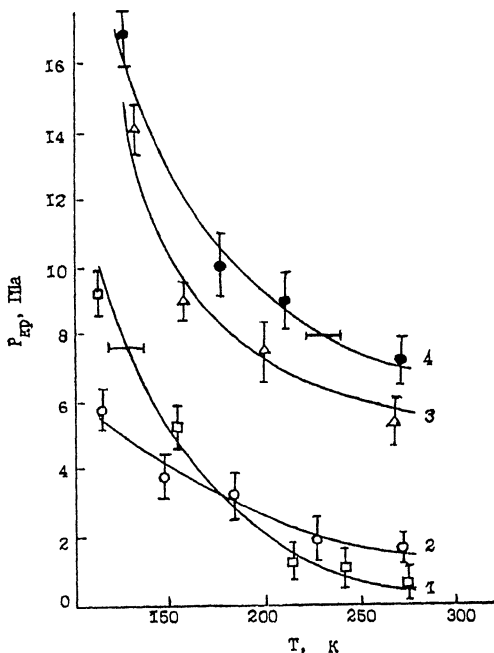


Рис. 1. Зависимости критического давления РВ  $P_{кр}$  от температуры для твердых веществ: 1 -  $FeSO_4 \cdot 7(H_2O)$ , 2 -  $S$ , 3 -  $NH_4Cl$ , 4 -  $Se$ . Сплошными линиями показаны аппроксимации экспериментальных точек оценочным выражением (1) в формализованном виде.

не удобны для данных исследований, ибо уже при 250 К их  $P_{кр}$  превосходили экспериментальные возможности установки (до 16 ГПа). Что касается скоростных зависимостей, то и здесь удобны выбранные вещества с низкими критическими давлениями РВ, т.к. при больших  $P_{кр}$  наковальни выдерживают всего несколько эффектов, после чего разрушаются. Система двух наковален с образцом между ними центрировалась специальной муфтой, имеющей тепловую изоляцию и термопару вблизи рабочей части. Для унификации плотности веществ в каждом случае образцы предварительно прессовались до монолитного состояния, и это контролировалось по относительной проводимости (по точке перегиба при переходе материала образца из зернистого состояния в монолитное [7]). Методическую трудность прямого эксперимента удалось решить при отдельном охлаждении системы наковален с образцом жидким азотом и дальнейшим помещением системы под пресс. В температурном эксперименте скорость нагружения выдерживалась постоянной, равной  $\approx 0.1$  ГПа/с, в то время как при исследовании скоростной зависимости поддерживалась постоянная температура  $T=293$  К. Полученные

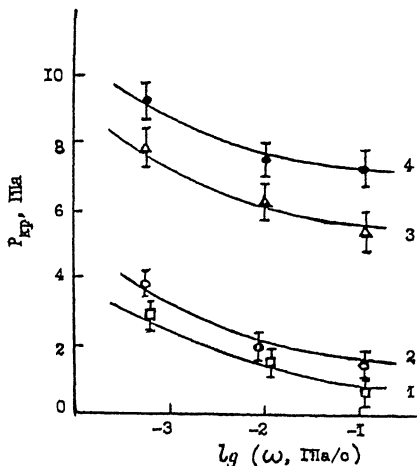


Рис. 2. Экспериментальные зависимости критического давления РВ  $P_{кр}$  от скорости нагружения системы сжатия для твердых веществ: 1 -  $FeSO_4 \cdot 7(H_2O)$ , 2 -  $S$ , 3 -  $NH_4Cl$ , 4 -  $Se$ .

В опытах данные неопровержимо свидетельствуют о существовании нелинейной температурной зависимости критического давления РВ (см. рис. 1) и о спадающей скоростной зависимости  $P_{кр}$  (см. рис. 2).

В нашей работе [8] для описания зависимости критического давления РВ от толщины образца на основе термофлуктуационной теории разрушения получено оценочное соотношение, имеющее связь и с температурой. Так, при  $T > \theta$  получено следующее выражение:

$$\sigma_* \approx \frac{\epsilon_* \bar{a}^3 c_p E}{3d^{1/4}} \left( \frac{T}{m \bar{v}^2} \right)^\alpha \left( 1 - \frac{\beta T}{3\epsilon_*} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right), \quad (1)$$

и при  $T < \theta$  :

$$\sigma'_* \approx \sigma_* \frac{\theta}{T},$$

где  $d$  - толщина образца,  $\bar{a}$  - атомный размер,  $E$  - модуль упругости,  $\epsilon_* \sim 0.2$  - разрывная деформация атомных связей,  $\beta$  - линейный коэффициент теплового расширения,  $c_p$  - решеточная теплоемкость,  $m$  - масса элементарной кристаллической ячейки,  $\bar{v}$  - скорость звука в теле,  $\tau$  - время ожидания критического зародыша разрушения,  $\tau_0 \sim 10^{-13}$  с - период тепловых атомных колебаний,  $T$  - абсолютная и  $\theta$  - дебаевская температуры. Показатель  $1/3 \leq \alpha \leq 3/4$  зависит от симметрии кристаллов в образце. Отме-

тим здесь, что между давлением на наковальнях и компонентами напряжений в дискообразном образце существует линейная корреляция [9].

В оценках, вслед за [6], будем считать постоянными и независимыми от температуры все коэффициенты, характеризующие вещество в упругой области сжатия для крупного разрушения, возбуждающего РВ. Несмотря на то, что эксперименты проводились при температурах выше Дебаевских для поликристаллических  $Se$  и  $S$  (порядка  $\theta \sim 150$  К при нормальных условиях), для описания полученных данных лучше подходит оценочное соотношение (1) с  $T < \theta$ . Действительно, в этом случае подгоночная кривая, полученная из формулы (1) в формализованном виде  $\sigma_* \sim AT^{\alpha-1}(1-T\theta)$ , имела прогиб вниз. Такая зависимость связана с сильным изменением температуры Дебая при высоких давлениях между наковальнями. В самом деле, приближительная оценка  $\theta$  в областях давлений 2–15 ГПа для  $Se$  и  $S$  по формуле [10]

$$\theta(p) \approx \theta_0 \left(1 + \frac{3}{2} \alpha p\right) \quad (2)$$

(при  $\alpha \sim 1.6 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> для  $Se$  и  $\alpha \sim 6 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> для  $S$  [11]) показывает ее рост в 3–4 раза. Здесь  $\theta_0$  – температура Дебая при нормальных условиях, а  $\alpha$  – коэффициент линейной сжимаемости вещества. Прогиб в температурной зависимости обусловлен, как следует из [8], связью критических процессов зарождения очагов разрушения с размерами образцов на миллиметровых масштабах, тогда как подобные температурные зависимости критического напряжения разрыва для классического разрушения толстых образцов при растяжении – прямые [6]. Полученные нами зависимости критического давления от скорости нагружения также хорошо укладываются в оценки подобных зависимостей, имеющих в термофлуктуационной теории разрушения [12]. Спадающий характер кривых (см. рис. 2) для всех испытанных веществ свидетельствует о хрупкости материалов, в которых даже при малых скоростях нагружения не успевают проходить процессы релаксаций и рассеяния дефектов, возбуждаемых при сжатии в неоднородных полях напряжений, обычных для открытых систем сжатия [9]. Чем больше скорость сжатия, тем быстрее накапливается критическая насыщенность тела дефектами, увеличивая вероятность возбуждения критического очага разрушения, инициирующего РВ.

Таким образом, представленные эксперименты свидетельствуют о существовании нелинейной температурной зависимости критического давления РВ и о спадающей зависимости критического давления РВ от скорости нагружения, что находит качественное объяснение в рамках термофлуктуационной теории разрушения твердых тел.

В заключение авторы выражают благодарность В.В. Меньшикову за помощь при изготовлении оснастки и И.А. Муртазину за полезные дискуссии.

- [1] B r i d g m a n P.W. // Phys. Rev. 1935. V. 48. N 15. P. 825-847.
- [2] Я р о с л а в с к и й М.А. Реологический взрыв. М.: Наука, 1982. 193 с.
- [3] Е н и к о л о п я н Н.С., М х и т а р я н А.А., К а - р а г е з я н А.С., Х з а р д ж я н А.А. // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. В. 4. С. 887-889.
- [4] Х а н В.П., Ф а т е е в Е.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 8. С. 81-84.
- [5] Е н и к о л о п я н Н.С. // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302. В. 3. С. 630-633.
- [6] Ж у р к о в С.Н. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 10. С. 3119-3123.
- [7] Ф а т е е в Е.Г. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 2. С. 72-77.
- [8] Ф а т е е в Е.Г. // Деп. в ВИНТИ 22.08.90, № 4745 - В90. 7 с.
- [9] Л е в и т а с В.И. Большие упруго-пластические деформации материалов при высоких давлениях. Киев: Наук. Думка, 1987. 232 с.
- [10] Р о д и о н о в К.П. // ЖТФ. 1956. Т. 26. В. 2. С. 375-378.
- [11] М а р и н о S. // Jap. J. Appl. Phys. 1968. V. 7. P. 1434-1437.
- [12] К а з а ч у к А.И., С о л н ц е в а И.Ю., С т е п а - н о в В.А., Ш п е й з м а н В.В. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 7. С. 1945-1952.

Поступило в Редакцию  
24 февраля 1991 г.  
В окончательной редакции  
9 августа 1991 г.