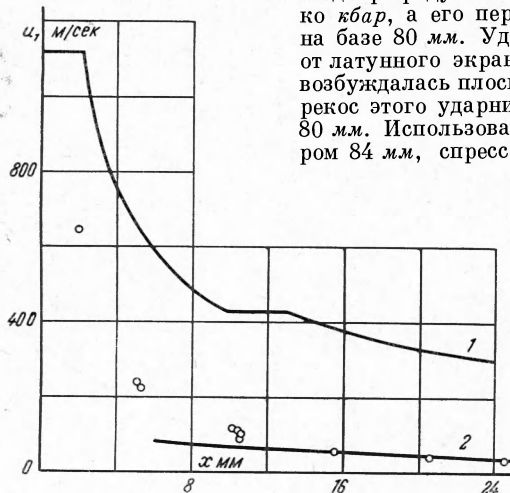


ВЯЗКОСТЬ NaCl ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

И. В. Белинский, Б. Д. Христофоров
(Москва)

Приводятся результаты определения вязкости в сжатом плоской ударной волной NaCl по времени нарастания и максимальной амплитуде волны на различных расстояниях от границы образца в диапазоне давлений от 1.5 до 90 кбар. Ударные волны в NaCl возбуждались ударом алюминиевых пластин толщиной 0.5 мм, разогнанных до скоростей $w = 1650$ и 1720 м/сек. Разгон до скорости 1650 м/сек производился листовым взрывчатым веществом (ВВ) толщиной 1 мм скользящей детонационной волной.

Подпор продуктов взрыва за ударником составлял несколько кбар, а его перекося и искривление не превышали 0.5 мм на базе 80 мм. Ударник со скоростью 1720 м/сек отлетал от латунного экрана толщиной 5 мм, в котором ударом возбуждалась плоская ударная волна. Искривление и перекося этого ударника не превышали 0.3 мм на диаметре 80 мм. Использовались образцы из порошка NaCl диаметром 84 мм, спрессованные до плотности $\rho_0 = 1.87$ г/см³, при пористости, равной 1.17. В опытах регистрировалась массовая скорость u в волне в функции времени на расстояниях от 2 до 25 мм от границы соударения электромагнитным методом, предложенным Е.К. Завойским. Средние значения максимальной массовой скорости u_1 и времени Δt нарастания волны приведены в таблице и на фиг. 1, а экспериментальные осциллограммы — на фиг. 2. На верхнем луче осциллограммы регистрируется массовая скорость на расстоянии $x = 5.1$ мм ($u_1 = 240$ м/сек, $\Delta t = 0.55$ мксек). На нижнем луче при $x = 10.2$ мм, $u_1 = 114$ м/сек, $\Delta t = 3.4$ мксек. Наличие отрицательной фазы связано



Фиг. 1. Зависимость максимальной массовой скорости u_1 от расстояния x

с искажениями, возникающими при больших временах регистрации при использованной в этой точке конструкции датчика. Таким образом, с увеличением расстояния, проходимо ударной волной, скорость u_1 быстро уменьшается, причем $u_1 \sim x^{-1.23}$, а длительность и время нарастания волны увеличиваются.

Поскольку в исследованном диапазоне расстояний давления в ударных волнах изменяются от 90 до 1.5 кбар и при этом значительно превосходят предел прочности и текучести образцов, то естественно анализировать полученные результаты, используя жидкую модель твердого тела.

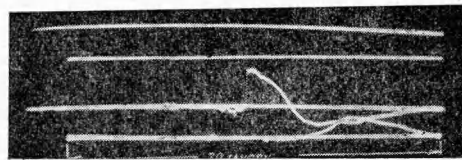
Расчеты параметров ударной волны, проведенные для случая идеальной жидкости, не описывают результатов эксперимента (кривая 1 на фиг. 1).

В расчете предполагалось, что приращением энтропии на фронте можно пренебречь, а связь давления и массовой скорости во всей области течения в NaCl совпадает с соответствующим соотношением на фронте [1]

$$p = \rho_0 (\alpha + \beta u) u \quad (1)$$

Параметры $\alpha = 2.54$ км/сек, $\beta = 1.46$ были определены по данным об уравнении состояния NaCl [2] при $\rho_0 = 1.87$ г/см³. В области давлений, где вещество можно считать жидким, а схема идеальной жидкости не описывает наблюдаемых явлений, естественно использовать для анализа результатов модель вязкой жидкости. При этом влиянием теплопроводности можно пренебречь, так как ее вклад в диссипацию энергии незначителен. Для анализа результатов было использовано полученное в [3] решение задачи о затухании в вязкой жидкости плоской звуковой волны, вызванной импульсом, приложенным к границе вещества. Откуда

$$u(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi ax}} \int_0^{\infty} u_0(\tau') \exp\left(-\frac{(\tau - \tau')^2}{4ax}\right) d\tau', \quad \tau = t - \frac{x}{c}, \quad a = \frac{\eta}{2\rho_0 c^3} \quad (2)$$



Фиг. 2. Экспериментальная осциллограмма ударной волны. Длительность развертки 30 мксек

где $u_0(\tau')$ — зависимость массовой скорости на границе вещества от времени, η — вязкость, включающая в себя оба коэффициента вязкости [3], $c = 3.25$ км/сек — скорость звука, которая была определена из ультразвуковых измерений. В случае короткого начального импульса, что соответствует условиям эксперимента,

$$u(x, \tau) = \frac{\exp(-\tau^2/4ax)}{\sqrt{4\pi ax}} \int_0^{\infty} u_0(\tau') d\tau' \quad (3)$$

Использование звукового приближения вполне оправдано на больших расстояниях, где $u/c \ll 1$.

В условиях проведения опытов максимум ударной волны имеет место при $\tau \approx 0$. Приняв за начало волны момент $\tau = 1.7 \sqrt{4ax}$, что соответствует минимальному разрешаемому отклонению луча на осциллограмме, получим выражение для ударной вязкости

$$\eta = \frac{(\Delta\tau)^2 \rho_0 c^3}{5.8x} \quad (4)$$

Здесь $\Delta\tau = 1.7 \sqrt{4ax}$ — время нарастания волны.

Результаты расчета вязкости по формуле (4) — η_1 и по формуле (3) — η_2 (при $\tau = 0$) приведены в таблице. Согласие между значениями η_1 и η_2 улучшается при

x , мм	$\Delta\tau$, мксек	u_1 , м/сек	p_1 , кбар	$\eta_1 \cdot 10^{-4}$, нз	$\eta_2 \cdot 10^{-4}$, нз
$w = 1650$ м/сек					
0	—	1120	87	—	—
2	0.31	647	42	0.5	1
5.1	0.55	240	13	0.7	3
10.2	3.4	114	5.8	12	7
10.3	3.7	112	5.7	15	7
15.5	4.2	57	2.8	13	18
20.5	5.8	42	2.1	19	25
$w = 1720$ м/сек					
5.2	0.67	225	12	0.9	4
10.3	3.7	110	5.6	15	8
10.5	4	90	4.5	17	11

ослаблении ударной волны, что соответствует предпосылкам расчета. В работе [4] другим методом у монокристаллов NaCl при $p = 240$ кбар получено $\eta = (2 \pm 1) 10^5$ нз, а в образцах с пористостью 1.3 при $p = 205$ кбар, $\eta < 10^4$ нз, что согласуется с приведенными выше результатами. Рассчитанная по формуле (2) зависимость $u_1(x)$ при $\eta = 1.3 \cdot 10^5$ нз (кривая 2 на фиг. 1) удовлетворительно описывает опытные данные на больших расстояниях.

Необходимо отметить, что в расчете вязкость предполагалась постоянной. Это противоречит результатам опытов, из которых следует, что вязкость возрастает с уменьшением давления. Следовательно, определенные по формулам (2) — (4) значения η суть средние в диапазоне давлений от начального на границе соударения до измеренного в точке x , по данным которой определялось η .

Авторы благодарят Г. М. Шефтера — за обсуждение результатов, А. А. Игнатов и Э. А. Широкову — за помощь при проведении экспериментов.

Поступила 5 VII 1967

ЛИТЕРАТУРА

- Белинский И. В., Христофоров В. Д. О затухании в алюминии плоских ударных волн, вызванных ударом. ПМТФ, 1967, № 3.
- Альтшулер Л. В., Павловский М. Н. и др. Исследование галогенидов щелочных металлов при высоких давлениях и температурах ударного сжатия. Физ. твердого тела, 1963, т. 5, № 1.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1954.
- Минеев В. Н., Савинов Е. В. Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и NaCl при ударном сжатии. Ж. эксперим. и теор. физ., 1967, т. 52, № 3.