

05;12

Упругопластическое поведение мрамора, гранита и кварцита в условиях ударного сжатия

© А.Е. Ковалев, М.Н. Павловский, В.М. Бельский, В.В. Комиссаров

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: root@gdd.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 13 сентября 2000 г.)

Экспериментально выявлены профили упругопластических ударных волн нагружения в трех горных породах: мраморе ($\rho_0 = 2.68 \text{ g/cm}^3$), кварците ($\rho_0 = 2.65 \text{ g/cm}^3$) и граните ($\rho_0 = 2.63 \text{ g/cm}^3$). Во всех исследованных веществах экспериментально зафиксировано расщепление ударного фронта на опережающий упругий предвестник и следующую за ним пластическую волну сжатия. Зафиксировано размытие фронта упругого предвестника и затухание его амплитуды по мере распространения по образцам всех исследованных веществ. Резкого снижения амплитуд упругих волн ("зуба" текучести) для исследуемых веществ не зафиксировано. Определены давления в упругой и пластической волнах сжатия, волновые и массовые скорости, а также величины относительного сжатия данных веществ.

Целью проведения ударно-волновых измерений упругопластических свойств горных пород является получение информации, необходимой для расчета действия мощных подземных взрывов, расчета действия метеоритных ударов, взрывной стимуляции нефтеносных пластов, решения других прикладных задач. Поэтому в поле зрения исследователей попали в первую очередь наиболее распространенные геологические материалы.

Актуальность работы обусловлена и необходимостью получения новых экспериментальных данных, на основе которых возможны разработка и совершенствование теоретических моделей поведения горных пород (мрамор в этом отношении является одним из наиболее пригодных материалов для проведения подобных исследований) в условиях ударного сжатия.

Применительно к горным породам полная ясность в трактовке их поведения при ударном нагружении к настоящему времени отсутствует. В частности, принципиальным является наличие или отсутствие резкого фронта упругого предвестника. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные (в том числе и полученные авторами) свидетельствуют о том, что в некоторых горных породах фронт упругой волны размыт. Последнее свидетельствует, возможно, об аномальной сжимаемости или прочности материала.

Целью данной работы является исследование упругопластических свойств гранита, кварцита и мрамора.

Определение упругопластических параметров осуществлялось при помощи методики, использующей манганиновый датчик давления, так как она позволяет измерять давления непосредственно в исследуемых материалах [1,2]. Датчик изготавливался в виде бифилярной спирали из манганиновой проволоки диаметром 0.1 mm, расплющиваемой затем между пуансонами пресс-формы до толщины $\sim 0.03 \text{ mm}$. Начальное сопротивление датчика $R_0 \sim 1.5 \Omega$, а диаметр его равнялся $\sim 5 \text{ mm}$.

Профиль ударно-волнового импульса в исследованных веществах выявлялся в опытах, редакция про-

ведения которых схематически представлена на рис. 1. В качестве зарядов взрывчатого вещества использовались цилиндры из ТГ 50/50 или ТНТ диаметром 90 или 120 mm, толщиной 40 mm. Для получения на осциллограмме метки времени, необходимой для последующей обработки экспериментальных данных, к экрану прикреплялся электроконтактный датчик. Регистрация снимаемых с датчика сигналов осуществлялась при помощи цифрового осциллографа типа HP54645D (США), а также аналогового осциллографа типа С9-4. Измерения выполнялись по потенциометрической схеме [2].

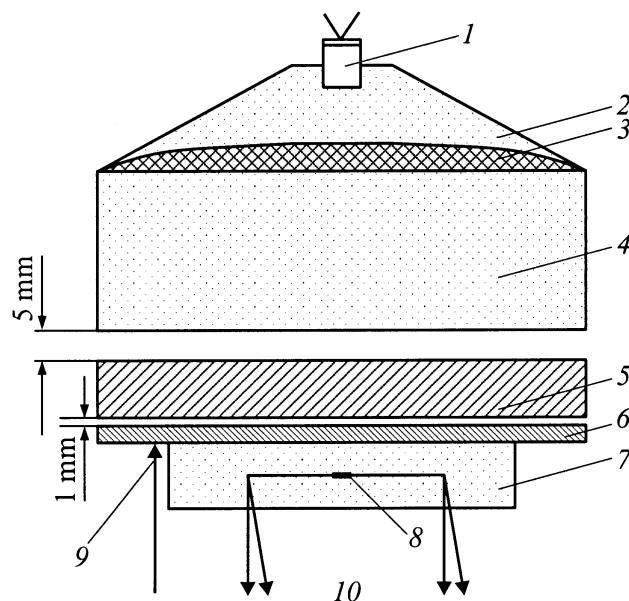


Рис. 1. Редакция проведения опыта: 1 — электродетонатор, 2 — плосковолновой генератор, 3 — линза из пенопласта, 4 — заряд ВВ, 5 — ударник, 6 — экран, 7 — образец, 8 — манганиновый датчик, 9 — электроконтактный датчик, 10 — к осциллографам.

Таблица 1. Экспериментальные результаты по определению параметров упругопластического течения в мраморе ($\rho_0 = 2.68 \text{ g/cm}^3$)

№	$\Delta, \text{ mm}$	$P_1, \text{ GPa}$	$C_1, \text{ km/s}$	$D'_2, \text{ km/s}$	$D''_2, \text{ km/s}$	$P_2, \text{ GPa}$	$t_1, \mu\text{s}$	$t_2, \mu\text{s}$
1	2.00	1.79	8.52	5.07	4.99	7.60	0.24	0.40
2	3.96	1.80	7.04	4.77	4.68	7.36	0.57	0.84
3	4.00	1.70	—	—	—	7.00	—	—
4	5.97	1.64	5.98	4.38	4.28	7.52	1.00	1.38
5	8.10	1.65	—	—	—	6.70	—	—
6	14.03	1.60	5.58	4.36	4.26	10.20	2.50	3.24
7	18.05	1.55	5.61	4.54	4.44	9.76	3.22	4.00
8	24.09	1.48	5.82	4.44	4.34	9.27	4.14	5.46
9	19.40	1.37	—	—	—	6.00	—	—
10	20.00	1.40	—	—	—	6.00	—	—
11	20.00	1.25	—	—	—	5.70	—	—
12	28.70	1.30	—	—	—	4.70	—	—
13	20.00	1.47	—	—	—	—	—	—

Примечание. Средние значения параметров упругой ($U_1 = 0.1 \text{ km/s}$, $\rho_1 = 2.72 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_1 = 1.016$) и пластической волн сжатия ($\rho_2 = 3.14 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_2'' = 1.155$) не вошли в табл. 1.

На рис. 2 представлены в качестве иллюстрации типичные осциллограммы, полученные при помощи осциллографа типа С9-4 в опытах с мрамором и кварцитом. Для повышения временной разрешающей способности экспериментальных измерений (для выявления "зуба" текучести) были проведены опыты с использованием кварцевого датчика давления, а также с применением американского осциллографа HP54645D. Осциллограмма одного из этих опытов представлена на рис. 3.

Давление нагружения определялось из экспериментально измеренной величины электросопротивления R манганинового датчика в сжатом состоянии, которое рассчитывалось по формуле

$$R = R_0(Z_0 - Z_1 + Z)Z_0^{-1}, \quad (1)$$

где R_0 — начальное сопротивление датчика; Z_0, Z_1 и Z — амплитуды отклонения луча на осциллограмме (рис. 2, а). При переходе от R/R_0 к давлению P использовались зависимости электросопротивления манганина от давления ударного нагружения $P = f(R/R_0)$ из [3,4]. Точность определения давлений составляла 2–3%.

Экспериментальные результаты, характеризующие упругопластические параметры мрамора, изучавшегося наиболее обстоятельно, обобщены в табл. 1. Помещенные в табл. 1 данные по мрамору, так же как и данные для других материалов, рассчитывались по формулам

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\Delta}{t_1}, & D'_2 &= \frac{\Delta + U_1(t_2 - t_1)}{t_2}, \\ U_1 &= \frac{P_1}{C_1 \rho_0}, & D''_2 &= D'_2 - U_1, \\ \sigma_1 &= \frac{C_1}{C_1 - U_1}, & \sigma_2'' &= \frac{D''_2}{D''_2 - (U_2 - U_1)}, \\ \rho_1 &= \rho_0 \cdot \sigma_1, & \rho_2 &= \rho_1 \cdot \sigma_2''. \end{aligned} \quad (2)$$

где Δ — толщина образца, t_1 и t_2 — времена прохождения по образцу упругой и пластической волн сжатия от экрана до манганинового датчика соответственно, C_1 — скорость распространения упругой волны сжатия, P_1 — давление в упругой волне сжатия, U_1 — скорость вещества за фронтом упругой волны сжатия, U_2 — скорость вещества за фронтом пластической волны сжатия, σ_1 — сжатие вещества упругой волной, σ_2'' — сжатие вещества пластической волной относительно упругой,

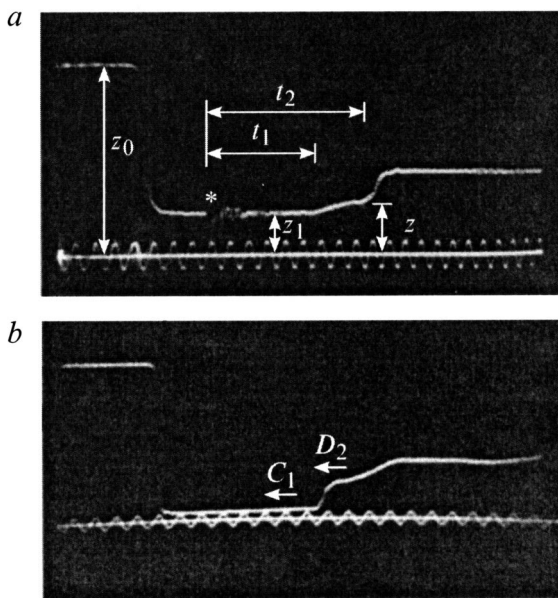


Рис. 2. а — $\Delta = 3.96 \text{ mm}$; давление нагружения образца мрамора — 7.36 GPa ; звездочкой помечен момент замыкания ударной волной электроконтакта, установленного на границе раздела экран-образец; частота масштабной синусоиды на осциллограмме 10 MHz ; б — $\Delta = 15.7 \text{ mm}$, давление нагружения образца кварцита 10 GPa , частота масштабной синусоиды на осциллограмме 5 MHz .

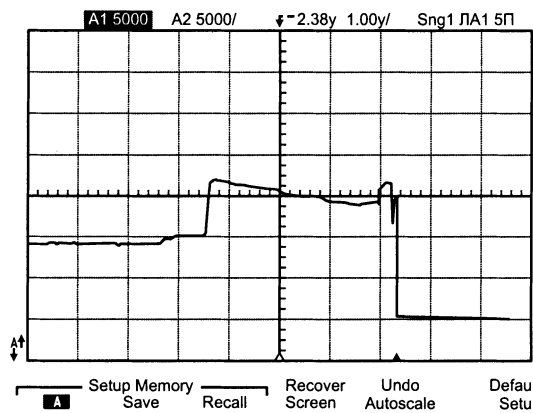


Рис. 3. Осциллограмма опыта с мрамором (HP54645-D), $\Delta = 8.0$ mm. Давление нагружения 6.98 GPa.

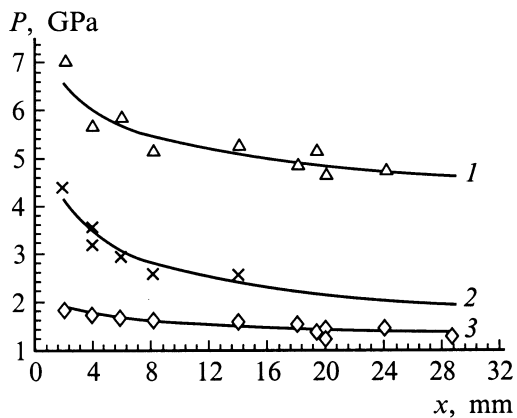


Рис. 4. Затухание упругого предвестника в горных породах: 1 — кварцит, 2 — гранит, 3 — мрамор.

ρ_0 — начальная плотность вещества, ρ_1 — плотность вещества за фронтом упругой волны сжатия, ρ_2 — плотность вещества за фронтом пластической волны сжатия, D'_2 , D''_2 — скорости распространения пластической волны сжатия в лабораторной системе координат и относительно движущегося вещества.

В табл. 2 и 3 обобщены данные эксперимента, характеризующие упругопластические параметры кварцита и гранита соответственно. Экспериментально полученные зависимости амплитуд упругих предвестников от толщин образцов мрамора, кварцита и гранита представлены на рис. 4. Упомянутые зависимости затухания амплитуд от толщины образцов $P_1(x)$ описываются формулами $P_1 = 2.0369x^{-0.1189}$, $P_1 = 7.206x^{-0.13}$ и $P_1 = 5.103x^{-0.2848}$ для мрамора, кварцита и гранита соответственно.

Из представленных на рис. 4 зависимостей амплитуд упругих волн в горных породах от толщины образцов можно сделать очевидный вывод о том, что эти амплитуды уменьшаются с расстоянием прохождения упругих волн по образцам. Естественно, наклон кривых затухания для разных материалов неодинаков из-за различия фи-

зических свойств этих материалов. Из представленных осциллограмм видно, что амплитуды упругих волн в мраморе и других исследованных горных породах имеют плавный характер нарастания. Отмеченный в [5,6] при исследовании железа и LiF "зуб" текучести отсутствует. Следует отметить, что при исследовании авторами в качестве контрольных материалов монокристаллического фтористого лития, сжимавшегося в направлении кристаллографической оси $\langle 100 \rangle$, и "хилумина" (керамика с содержанием 94% Al_2O_3 , $\rho_0 = 3.65$ g/cm³) был зафиксирован плавный характер нарастания амплитуды упругих волн и не обнаружено никаких признаков "зуба" текучести в этих веществах.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Фронт упругого предвестника размыт, а его амплитуда уменьшается по мере распространения по образцам исследованных веществ.
2. Резкого снижения амплитуд упругих волн ("зуб" текучести) у исследованных веществ не зафиксировано.
3. Полученные результаты свидетельствуют о возможном аномальном поведении исследованных горных пород (сжимаемость, прочность) в условиях ударного сжатия и являются основанием для проведения дальнейших исследований, например исследования их сдвиговой прочности при ударном нагружении.

Таблица 2. Экспериментальные результаты по определению параметров упругопластического течения в кварците ($\rho_0 = 2.65$ g/cm³)

№	Δ , mm	P_1 , GPa	C_1 , km/s	D'_2 , km/s	D''_2 , km/s	P_2 , GPa
1	4.0	7.1	5.95	—	—	7.6
2	10.0	5.7	—	5.14	4.27	11.0
3	11.0	5.7	—	—	—	11.6
4	11.5	5.9	—	—	—	8.4
5	15.0	5.2	—	—	—	13.8
6	15.7	5.3	5.05	4.65	4.20	10.0
7	20.0	4.9	—	—	—	—
8	25.0	4.8	—	—	—	11.7
9	33.2	5.2	—	—	—	13.0
10	36.3	4.7	—	—	—	11.5

Примечание. Средние значения параметров упругой ($U_1 = 0.45$ km/s, $\rho_1 = 2.83$ g/cm³, $\sigma_1 = 1.063$) и пластической волн сжатия ($U_2 = 1.12$ km/s, $\rho_2 = 3.07$ g/cm³, $\sigma''_2 = 1.155$) в кварците не вошли в табл. 2.

Таблица 3. Экспериментальные результаты по определению параметров упругопластического течения в граните ($\rho_0 = 2.63$ g/cm³)

№	Δ , mm	P_1 , GPa	P_2 , GPa	t_1 , μ s
1	9.0	4.4	10.0	1.64
2	15.0	3.6	—	2.73
3	30.0	3.2	—	3.64
4	25.0	3.0	—	4.55
5	31.0	2.6	—	5.64
6	36.0	3.6	—	6.55

Полученные экспериментальные данные являются исходным материалом, на основе которого возможно, по-видимому, совершенствование существующих моделей поведения твердой среды при ее ударном сжатии.

Список литературы

- [1] Дремин А.Н., Канель Г.И. // ПМТФ. 1976. Т. 2. С. 146–152.
- [2] Павловский М.Н., Степанюк В.С., Комиссаров В.В. // Проблемы прочности. 1991. № 10. С. 50–54.
- [3] Павловский М.Н., Комиссаров В.В. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. Вып. 6(12). С. 2146–2151.
- [4] Павловский М.Н., Комиссаров В.В., Кутсар А.Р. // ФГВ. 1999. Т. 35. № 1. С. 98–101.
- [5] Дьювал Д. // Физика высоких плотностей энергии / Под ред. П. Кальдиролы, Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974. С. 40–46.
- [6] Иванов А.Г., Новиков С.А., Сидицын В.А. // ФТТ. 1963. Т. 5. Вып. 1. С. 269–278.