

К ВОПРОСУ О ДИНАМИЧЕСКОЙ СЖИМАЕМОСТИ УГЛЕРОДА

А. Н. Дремин, С. В. Першин

(Москва)

К настоящему времени опубликованы две зарубежные [1, 2] и одна отечественная [3] работы по исследованию динамической сжимаемости углерода. Ударная адиабата искусственного пиролитического графита, состоящего исключительно из гексагональной модификации углерода, в исследованной Колебурном до 0,5 мбар области давлений [1] не обнаруживает каких-либо аномалий в его поведении (рис. 1). Природный графит, кроме гексагональной, может содержать до 30% ромбоэдрической модификации углерода [4]. Превращение природного графита в алмаз при ударном сжатии впервые зафиксировали Алдер и Христиан [2] по изломам ударной адиабаты при 0,2 и 0,4 мбар. Область между этими давлениями они считают областью смешанных фаз — графита и алмаза. Кривая ударного сжатия имеет еще один излом при 0,6 мбар. Причиной появления которого авторы [2] считают переход графита в металлическую фазу. Это мнение опровергается в работе [3], где в диапазоне давлений 0,4–3,25 мбар выявлен плавный (без излома) ход ударной адиабаты графита на «алмазном участке». Поэтому результаты [2] считаются ошибочными, и высказывается предположение, что

они были получены на образцах, толщина которых не соответствовала толщине ударников, вследствие чего параметры ударных волн в графите были искажены волнами разгрузки.

К сожалению, в работе [2] нет описания опыта, необходимого для анализа. В работе [3] данные изложены подробно¹, и их анализ позволяет сделать некоторые замечания как общего, так и частного характера в соответствии с настоящей работой.

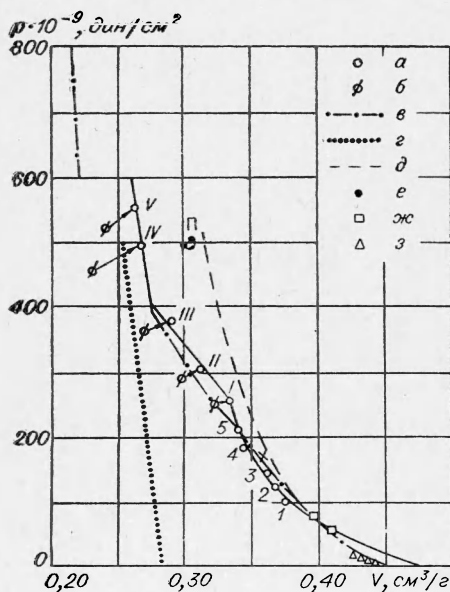


Рис. 1. Ударная адиабата графита.

a — данные авторов; *б* — фиктивные точки; *в* — данные Алдера и Христиана [2]; *г* — экстраполированная по статическим данным кривая сжимаемости алмаза [2]; *д* — данные Колебурна [1]; *е* — по данным Павловского и Дракина [3]; *ж* — данные Бриджмена [7]; *з* — данные Верещагина [8].

¹ Подробно данные работы [3] изложены в диссертации М. Н. Павловского (диссертационный отдел библиотеки им. В. И. Ленина).

Замечание общего характера состоит в том, что в работе [3] метод отражения использован для построения точек ударной адиабаты непосредственно по значениям скоростей ударных волн, измеренных на конечных базах в условиях затухания ударной волны. О неправомочности таких построений речь пойдет ниже.

Частное замечание относится к допущению авторов [3], что средняя измеренная на конечной базе скорость ударной волны равна мгновенной скорости в середине этой базы. Это допущение привело к тому, что в $(p-v)$ -координатах точка П (см. рис. 1) ударной адиабаты графита для нулевой толщины образца оказалась правее своего истинного положения. Как будет показано ниже, мгновенная скорость в середине базы измерения $S/2$ ниже средней скорости ударной волны, измеренной на базе S . Эта разница для обсуждаемого случая составляет 150 м/сек. Соответствующее минимальное смещение точки П в $(p-v)$ -координатах показано на рис. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе методом отражения [5, 6] исследовалась ударная адиабата обеззоленного графита Тайгинского месторождения. Плотность спрессованных образцов равнялась $2,08 \text{ г/см}^3$, что составляет 91,1% от теоретической плотности монокристаллического графита ($\rho_0 = 2,284 \text{ г/см}^3$), рассчитанной по известной кристаллической решетке графита.

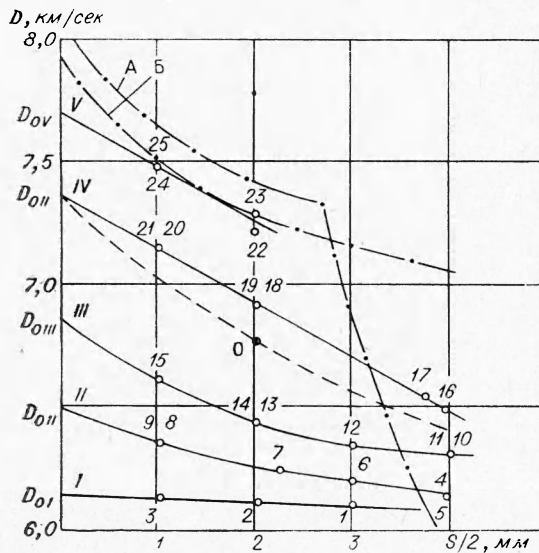
Номера точек (см. рис. 2)	Массовая скорость в материале экрана (u_s), км/сек	База измерения скорости ударной волны (S), мм	Скорость ударной волны (D_s), км/сек	Величины, рассчитанные по результатам экстраполяции средних значений D_s к нулевой толщине образца				Номера точек в $(p-v)$ -координатах (см. рис. 1)
				D_0 , км/сек	u , км/сек	$p \cdot 10^{-9}$, дин/см ²	V , см ³ /г	
1	1,65	6,00	6,09	6,15	1,96	258	0,335	I
2		4,02	6,11					
3		2,01	6,13					
4	1,9	7,92	6,12	6,48	2,27	304	0,131	II
5		7,55	6,14					
6		6,01	6,20					
7		4,25	6,25					
8		2,00	6,35					
9	1,96	6,35						
10	2,25	8,03	6,32	6,85	2,69	380	0,292	III
11		8,00	6,30					
12		6,02	6,34					
13		4,04	6,41					
14		4,05	6,44					
15	2,02	6,625						
16	2,72	7,90	6,48	7,37	3,24	495	0,269	IV
17		7,51	6,54					
18		4,08	6,915					
19		4,08	6,975					
20		2,06	7,12					
21	2,03	7,14						
22	2,91	4,05	7,21	7,70	3,43	549	0,266	V
23		4,03	7,29					
24		2,09	7,465					
25		2,01	7,485					

В опытах, где давление в графите не превышало $210 \cdot 10^9$ дин/см², зависимости скорости ударной волны от базы измерения ($S=4 \div 8$ мм) практически не наблюдалось. Результаты опытов представлены в ($p-u$)-диаграмме (см. рис. 1, 1, 5) и находятся в хорошем согласии со статическими [7, 8] и динамическими [2, 3] данными.

Зависимость скорости ударной волны от базы измерения была обнаружена в опытах, где давление в графите было выше $250 \cdot 10^9$ дин/см². Результаты этих опытов приведены в таблице, где в первом столбце указан номер точки на зависимости ($D_{\text{ср}} - \frac{S}{2}$) (рис. 2). Полученные при разных начальных давлениях в экране зависимости скорости ударной волны от толщины образца графита экстраполировались к толщине, равной нулю. Скорость D_0 получена экстраполяцией, а массовая скорость (u) и давление (p) в графите получены графическими построениями в ($p-u$)-координатах (по методу отражения) для значений D ; удельный объем рассчитан по формуле

$$V = V_0 \frac{D_0 - u}{D_0}.$$

Кроме зависимостей средней скорости ударной волны от базы измерения, на рис. 2 пунктирной линией нанесена зависимость мгновенных значений скорости ударной волны от различной толщины графита. Эти значения были получены зеркальным дифференцированием в ($t-x$)-диаграмме кривой хода ударной волны, построенной по тем же данным, что и зависимость IV (см. рис. 2). Аналогичные зависимости A и B для мгновенных значений скорости ударной волны построены по пересчитанным данным работы [3].



Эти значения были получены зеркальным дифференцированием в ($t-x$)-диаграмме кривой хода ударной волны, построенной по тем же данным, что и зависимость IV (см. рис. 2). Аналогичные зависимости A и B для мгновенных значений скорости ударной волны построены по пересчитанным данным работы [3].

Рис. 2. Зависимость скорости ударной волны в графите от толщины образца при различных начальных параметрах сжатия.

Отметим, что вплоть до толщины $S/2=4$ мм мгновенные скорости ударной волны оказываются ниже средней скорости, измеренной на базе S и отнесенной к середине этой базы $S/2$. Как видно из графика (см. рис. 2), измеренная на базе $S=4$ мм средняя скорость ударной волны (точки 18, 19) примерно на 150 м/сек превышает мгновенное значение скорости на глубине 2 мм (точка 0).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В основе метода отражения лежит условие равенства давления и массовой скорости на границе раздела экрана с исследуемым веществом. Поэтому для получения ударной адиабаты могут быть исполь-

зованы только те значения скорости ударной волны, которые возникают в исследуемом образце на границе с экраном. При затухании ударной волны с толщиной исследуемого образца скорости ударной волны, измеренные на конечных базах, не могут быть использованы для непосредственного построения точек ударной адиабаты по методу отражения. Если же такое построение все-таки проводится, то в $(p-v)$ -координатах появляются фиктивные точки (см. рис. 1), которые могут оказаться значительно левее ударной адиабаты алмаза. Поэтому ударная адиабата графита (см. рис. 1) в настоящей работе получена по результатам экстраполяции к нулевой толщине образца значений скорости ударной волны, измеренной на различных базах (см. рис. 2). Излом адиабаты при $\sim 250 \cdot 10^9 \text{ дин/см}^2$ свидетельствует о начале фазового превращения графита во фронте ударной волны, процент которого растет с ростом давления. При давлении $400 \cdot 10^9 \text{ дин/см}^2$ высокий процент превращения графита в ударной волне становится малочувствительным (либо нечувствительным) к давлению — ход ударной адиабаты становится более крутым. Крутизна «алмазного» участка ударной адиабаты графита, совпадающего с кривой Алдера и Христиана [2], практически та же самая, что и у экстраполированной к высоким давлениям кривой сжимаемости алмаза в статических условиях. В хорошем согласии с этой кривой, приведенной в работе [2], находятся данные [3] по динамической сжимаемости алмаза. Близость «алмазного» участка ударной адиабаты графита с ударной адиабатой алмаза позволяет заключить, что при давлениях выше $400 \cdot 10^9 \text{ дин/см}^2$ происходит весьма близкое к полному превращению графита в алмаз во фронте ударной волны. Здесь следует отметить, что сжатие графита на «алмазном» участке ударной адиабаты осуществляется летящим металлическим ударником, который в нереагирующем материале создает ударную волну с постоянным прямоугольным профилем, и напомнить, что «алмазный» участок построен по значениям скоростей ударных волн, экстраполированным к нулевой толщине образца графита. Однако как бы ни был велик процент превращения во фронте ударной волны, он все-таки еще не равен 100 даже при давлениях порядка $600 \cdot 10^9 \text{ дин/см}^2$. Затухание ударной волны по глубине образца свидетельствует о том, что превращение продолжается и за фронтом ударной волны. Чем выше давление, тем быстрее происходит затухание ударной волны с расстоянием. При такой зависимости разница в скорости затухания ударных волн с большой и малой начальной амплитудой во времени будет еще большей, чем в пространстве. Поскольку затухание связано с фазовым превращением, естественно считать, что скорость превращения растет с давлением.

Авторы выражают благодарность Б. В. Коновалову за участие в проведении точных экспериментов.

Поступила в редакцию
12/VII 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. N. L. Coleburn. J. Chem. Phys., 1964, 40, 73.
2. B. J. Alder, R. N. Christian. Phys. Rev. Lett., 1961, 7, 367.
3. М. Н. Павловский, В. П. Дракин. ЖЭТФ, письма, 1966, 4, 5, 169.
4. H. P. Voeht, U. Hoffman. L. anorg. Chem., 1955, 278, 58.
5. А. В. Альтшулер, К. К. Крупников, Н. И. Бражник. ЖЭТФ, 1958, 34, 874.
6. А. Н. Дремин, Г. А. Ададулов. Докл. АН СССР, 1959, 128, 261.
7. P. W. Bridgman. Proc. Am. Acad. Arts. and Sci., 1948, 76, 56.
8. L. F. Vereshchagin. Progress in Very High Pressure Research. N. Y., 1960, p. 290.