

ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА СМЕСЬ КВАРЦА С ПАРАФИНОМ

А. В. Ананьин, О. Н. Бреусов, Г. Е. Иванчихина,
В. Н. Исаев, С. В. Першин, В. Ф. Тацкий
(Черноголовка)

Ударная адиабата монокристаллического кварца испытывает излом начиная с $p = 14,4$ ГПа, а верхняя ветвь адиабаты экстраполируется к удельному объему, соответствующему стишовиту [1]. В то же время ударная сжимаемость, определенная смесевым методом (смесь с парафином), характеризуется изломом при 20 ГПа, а экстраполяция отвечает коэситу [2]. Исследование сохраненных после ударного сжатия монокристаллических образцов привело к выводу, что появление излома на адиабате кварца связано не только с переходом от одноосного сжатия к объемному, но и с аномальным уплотнением образующихся при этом расплавленных прослоек между блоками, на которые дробится кварц при ударе [3].

Аналогичный вывод сделан в [4] на основании того, что выше упругого предела скорость звука соответствовала вычисленной объемной. В этой работе предложена схема термического состояния кварца после прохождения ударного фронта (рис. 1), включающая в отличие от [3] и прослойки плотных фаз двуокиси кремния. Заметное свечение кварца во время ударного сжатия наблюдается только после преодоления предела упругости [5]. В [6] при исследовании ударного сжатия плавленного кварца для $p = 23 \div 31$ ГПа получены количественные данные о температуре. Яркостные температуры достигали 1770—2190 К, а цветовые — 3290—3450 К соответственно.

Представляло интерес выяснить, связан ли излом на смесевой адиабате кварца с его плавлением. С этой целью исследовали порошки кварца, сохраненные после ударного сжатия в смеси с парафином.

Методика эксперимента. Ударному сжатию по методике [3] подвергались прессованные диски диаметром 30 и высотой $1,8 \pm 0,1$ мм, состоящие по массе из 65% порошка кварца фракции 100/45 мкм и 35% парафина. Использовались «жесткие» ампулы сохранения. Выше 40 ГПа нагружение осуществлялось алюминиевыми ударниками. После ударного сжатия кварц отмывался октаном от парафина и хлорной кислотой — от продуктов разложения последнего.

Дифрактограммы записывались на медном фильтрованном излучении при скорости вращения гониометра $1/4$ град/мин. В качестве эталона использовался порошок кварца, приготовленный измельчением в смеси с крахмалом. Такие образцы обладали минимальными микроскажениями. Анализ тонкой структуры проводился методом ГАФРЛ [7, 8] по двум парам кратных отражений: [100]/[200] и [110]/[220]. ИК-спектры записывались в диапазоне $400-1700$ см⁻¹ в бромиде калия. Пикнометрическая плотность ρ определялась в этаноле. Погрешность определения составляла $\pm 0,01$ г/см³.

Результаты эксперимента. После нагружения накладными зарядами плотность сохраненных образцов кварца до $p = 13,7(37,0)$ ГПа не изменялась, а затем резко падала (рис. 2, а) (здесь и далее первые значения динамических давлений относятся к амплитуде первой ударной волны, входящей в образец, а цифры в скобках — к максимальному давлению). При использовании ударников падение плотности начина-

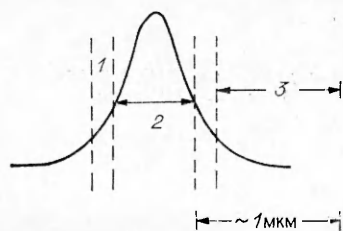


Рис. 1. Термическое состояние на границе блоков кварца за фронтом ударной волны по [4].

1 — высокоплотная твердая фаза; 2 — высокоплотная жидкость; 3 — низкоплотная твердая фаза.

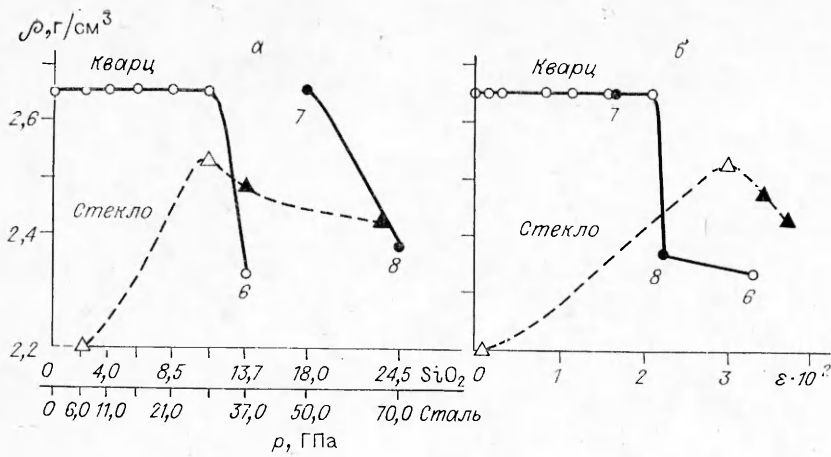


Рис. 2. Зависимость пикнометрической плотности ρ кварца и кварцевого стекла, сохраненных после ударного нагружения накладными зарядами (светлые точки) или (темные) ударниками в смеси с парафином, от амплитуды волн (а) и степени деформации крышки ампулы $\varepsilon = \frac{d_0 - d}{d_0}$ (б).

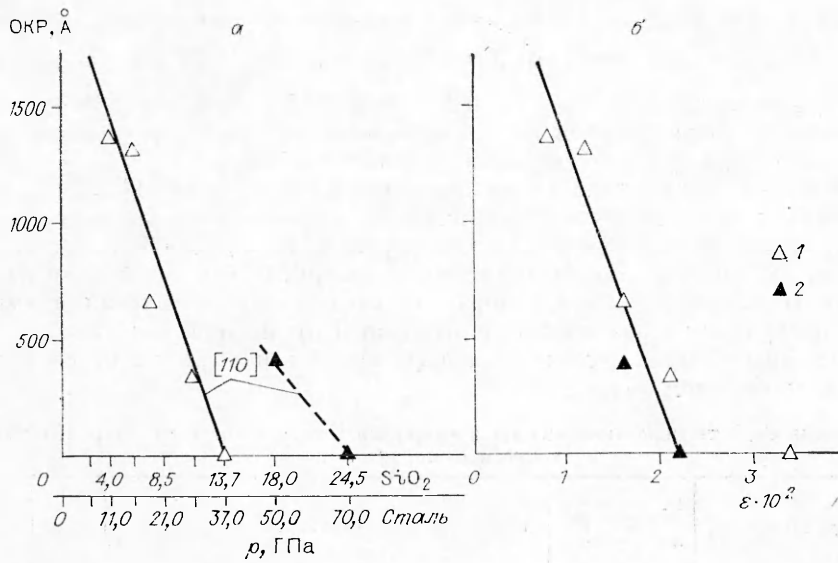


Рис. 3. Зависимость размера ОКР в направлении [110] от p (а) и ε (б). 1 — накладные заряды; 2 — ударники.

лось при больших давлениях. Отметим, что в экспериментах с монокристалльным кварцем уменьшение плотности начиналось при гораздо более низких давлениях [3].

Величина областей когерентного рассеяния (ОКР) в направлении [100] при малых p оставалась слишком большой для определения методом ГАФРЛ; в направлении [110] она достаточно уменьшалась уже при минимальных использованных воздействиях. Для рентгеноаморфных образцов размеры ОКР принимались равными нулю; так же как и для плотности, при переходе к ударникам наблюдалась аномалия (рис. 3, а). Во всех случаях размеры ОКР в направлении [100] были больше, чем в направлении [110]. Микроискажения кристаллической решетки (рис. 4, а), напротив, всегда были выше в направлении [100]. При использовании ударников также отмечена аномалия.

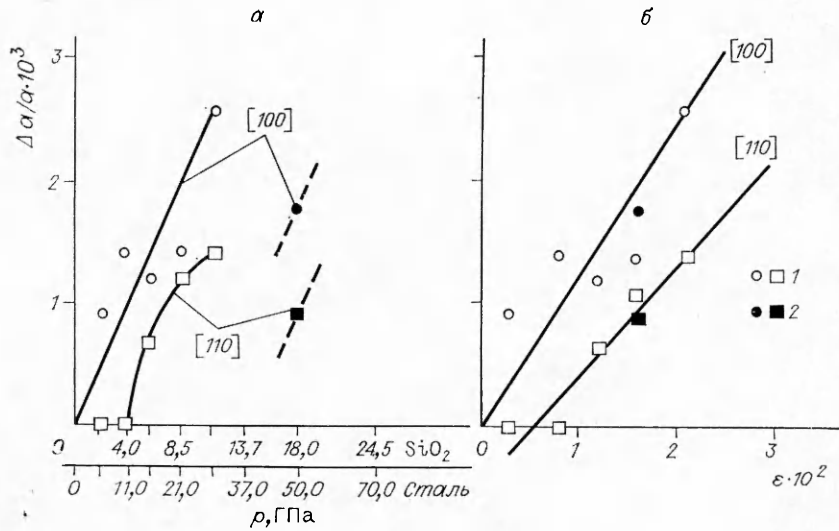


Рис. 4. Зависимость микроскажений кристаллической решетки кварца в направлениях [100] и [110] от p (а) и ϵ (б).
1 — накладные заряды; 2 — ударники.

Среднестатистические отклонения атомов из положения равновесия $\sqrt{\bar{u}^2}$ становились заметными только после 6,0 (15,5) ГПа и для всех образцов были близки и равны $0,29 \pm 0,03 \text{ \AA}$ (см. таблицу). ПК-спектры большинства образцов тождественны спектрам кварца, а для рентгеноаморфных образцов — спектрам кварцевого стекла.

Микрокристаллический анализ образцов до $p = 11,2(29,0)$ ГПа показал присутствие только кварца; рентгеноаморфные образцы кроме основной массы кварцевого стекла содержали 1—3% слабоанизотропных, не погасающих в поляризованном свете частиц. Существенно, что размер частиц во всех сохранных образцах независимо от условий и амплитуды нагружения практически не отличался от размера исходных частиц, т. е. ударное сжатие порошка кварца в смеси с парафином не сопровождалось дроблением частиц.

Изменение свойств порошков кварца и кварцевого стекла после их ударного сжатия в смеси с парафином

p , ГПа		Относительная степень деформации ампулы		Субструктура					ρ , г/см ³	S/S_0 , %	
Максимальное в стали	1-й УВ, входящей в смесь	$\Delta D/D_0$	$\Delta d/d_0$	ОКР, \AA		$\Delta a/a \cdot 10^3$		$\sqrt{\bar{u}^2}$, \AA			
				[100]/[200]	[110]/[220]	[100]/[200]	[110]/[220]				
6	2,2	-0,02	0,03	>2000	>2000	0,9	<0,1	—	2,65	0,85	
11	4	0,00	0,08	>2000	1360	1,4	<0,1	—	2,66	0,68	
15,5	6	0,05	0,12	>2000	1300	1,2	0,6	0,26	2,66	0,54	
21	8,5	0,06	0,16	690	660	1,4	1,1	0,28	2,65	0,28	
29	11,2	0,15	0,21	—	340	2,6	1,4	0,32	2,65	0,12	
37	13,7	0,22	0,33	Аморфное					2,33	0,00	
50	18	0,11	0,16	470	410	1,8	0,9	0,30	2,65	0,00	
70	24,5	0,20	0,22	Аморфное					2,37	—	
				Кварцевое стекло							
6	—	-0,02	0,01	—	—	—	—	—	2,20	—	
29	—	0,22	0,30	—	—	—	—	—	2,53	—	
37	—	0,27	0,34	—	—	—	—	—	2,48	—	
67	—	0,26	0,37	—	—	—	—	—	2,43	—	

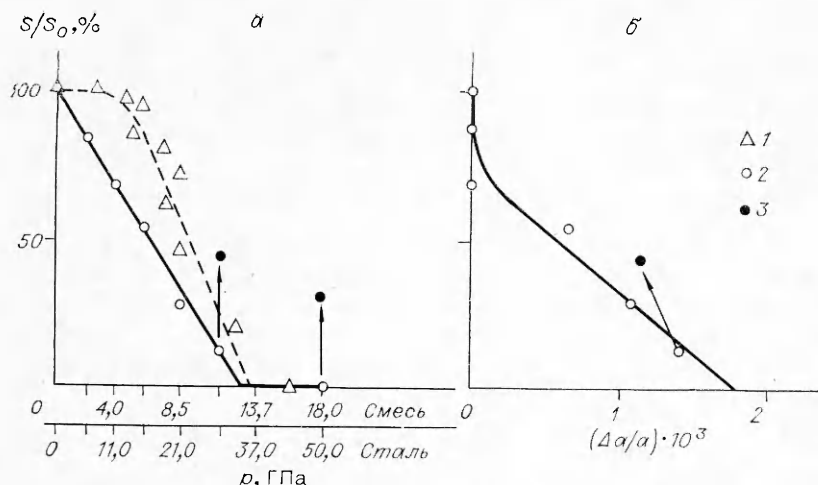


Рис. 5. Относительное изменение площади термографического пика $\beta \rightleftharpoons \alpha$ -перехода в зависимости от интенсивности ударного сжатия (а) и от микроискажений решетки (б).

1 — монокристаллы кварца; 2 — смесь кварца с парафином; 3 — образцы после сжатия при 1300° в течение 5 ч.

Ранее [3, 9] отмечалось, что ударное сжатие вызывает ослабление термического эффекта, сопровождающего $\beta \rightleftharpoons \alpha$ -превращение кварца при нагревании, вплоть до полного его исчезновения, начиная с 13,7 (37,0) ГПа, несмотря на то, что и пикнометрически и рентгенографически сохраненные образцы оставались обычным кварцем. На рис. 5, а представлено относительное изменение величины этого эффекта (площадей пика на термограммах) для образцов кварца, подвергнутых ударному сжатию в смеси с парафином, в сравнении со старыми данными для монокристаллов. Картины очень близки, но для смешанных образцов уменьшение эффекта начинается несколько раньше. Термический отжиг при 1300° в течение 5 ч приводил к частичному восстановлению эффекта.

Наконец, ранее отмечалось [3], что на свойства сохраненных образцов влияет не только амплитуда ударного сжатия, но и степень деформации ампулы, а следовательно, и образца. На рис. 6 представлены данные по деформации ампул, полученные в настоящей работе и выраженные через относительные изменения диаметра внутренней полости ампулы или толщины ее крышки. Видно, что и здесь в случае применения ударников наблюдается аномалия, явно вызванная уменьшением времени воздействия (с 4–10 до 1 мкс), хотя амплитуда ударных волн и возрастала.

На рис. 2, б—4, б сделана попытка сопоставить изменения значений пикнометрической плотности и величин ОКР и микроискажений решетки не от амплитуды ударной волны, а от степени деформации крышки ампулы. Видно, что в этом случае отмечавшиеся для ударников аномалии исчезают.

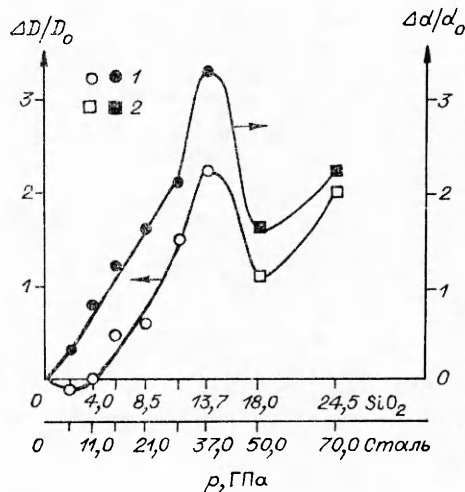


Рис. 6. Зависимость степени деформации ампулы от интенсивности сжатия.

1 — накладные заряды; 2 — ударники.

Обсуждение результатов. Совокупность представленных данных свидетельствует о том, что при ударном сжатии смеси кварца с парафином появление кварцевого стекла, вызванное плавлением кварца, начинается при значительно более высоких давлениях, чем в случае монокристаллических образцов, так как в экспериментах со смесями достигается гораздо большая гидростатичность сжатия и отсутствует дробление частиц на блоки, автоматически сопровождаемое появлением расплавленных прослоек. При достаточно высоких давлениях нагревание кварца усиливается за счет самого ударного сжатия и теплообмена с более горячим парафином; он плавится, и излом на смесевой ударной адиабате обусловлен, очевидно, тем же уплотнением этого расплава. Изменения, вызываемые в порошке кварца до появления расплава, связаны не столько с амплитудой ударного сжатия, сколько с самой деформацией, которая зависит и от продолжительности ударного импульса.

Усиление деформации приводит к росту нарушений реальной структуры, а именно к уменьшению размеров ОКР, росту микроискажений и среднестатистического отклонения атомов от положения равновесия. При этом вследствие анизотропии свойств кварца уменьшение размеров ОКР в направлении с относительно слабыми пределами прочности [110] идет быстрее, чем в направлении [100], а накопление «нераскрывшихся» напряжений — микроискажений решетки, напротив, идет быстрее именно в направлении самой прочной оси.

В возникновении микроискажений, как и предполагалось ранее, кроется причина «размазывания» термического эффекта $\beta \rightleftharpoons \alpha$ -превращения [9] вплоть до полного исчезновения его на термограммах. Высокотемпературный отжиг для двух образцов приводил к уменьшению микроискажений с $1,4 \cdot 10^{-3}$ и $0,9 \cdot 10^{-3}$ до $1,2 \cdot 10^{-3}$ и $1,0 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Одновременно частично восстанавливалась и величина термоэффекта. Размеры ОКР при этом практически не изменялись. На рис. 5, б построена зависимость термографического эффекта от микроискажений. Взаимосвязь очевидна. Расчет модуля Юнга в направлении [110], выполненный по данным [10], привел к величине 114 ГПа. Это позволяет утверждать, что $\beta \rightleftharpoons \alpha$ -переход перестает регистрироваться термографически, если микронапряжения решетки превысят 0,16 ГПа.

В заключение следует отметить, что при ударном сжатии смесей кварца с гидростатичными веществами его температура будет зависеть и от степени нагревания в ударных волнах окружающей его среды. Поэтому кажется, что замена парафина на другое вещество должна изменить начало излома на соответствующей смесевой ударной адиабате. Не исключено, что именно на этом пути лежит возможность использования ударного сжатия для синтеза плотных модификаций двуокиси кремния с приемлемым выходом. Однако обработка сохранных после ударного сжатия в смеси с парафином образцов кварца и кварцевого стекла 5%-ным раствором плавиковой кислоты на холоде привела к их полному растворению и не позволила ни в одном случае выделить коэзит или стипшит в сколь-либо заметных количествах.

Авторы благодарят Л. И. Копаневу за предоставление программы ГАФРЛ для ЭВМ и В. Е. Чемагина, В. П. Фадеева за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Wackerly. J. Appl. Phys., 1962, 33, 3, 922.
2. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин, С. В. Першин и др. ПМТФ, 1962, 4, 81.
3. А. В. Ананьин, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 426.
4. D. E. Grady, W. J. Murri, P. S. De Carly. J. Geoph. Res., 1975, 80, 35, 485.
5. P. J. Brannon, C. Konrad, B. W. Morris et al. J. Appl. Phys., 1983, 54, 11, 6374.
6. K. Kondo, T. J. Ahrens, A. Sawaoka. Ibid. 8, 4382.
7. Л. И. Миркин. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М.: Физматгиз, 1961.

8. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970.
 9. О. Н. Бреусов, В. Ф. Тацкий. ЖНХ, 1975, 20, 4, 860.
 10. Физическая акустика/Под ред. У. Мэзон. Т. IV, ч. Б. М.: Мир, 1970.

Поступила в редакцию 31/III 1986

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАНИЯ СИСТЕМОЙ ДВУХ ГАЗОВ

Э. И. Андрианкин, Р. Н. Воробьев, А. Л. Глебов
 (Москва)

При метании расширяющимся идеальным газом верхней оценкой для конечной кинетической энергии поршня является работа, совершаемая газом при квазистатическом адиабатическом расширении:

$$A = \frac{Mp_0v_0}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{Mv_0}{V} \right)^{\gamma-1} \right], \quad (1)$$

где M — масса газа; p_0, v_0 — начальные давление и удельный объем; γ — показатель адиабаты; V — полный объем цилиндрической трубы, в которой ускоряется поршень. Для оптимального значения массы газа эта работа не зависит от v_0 :

$$A_m = \gamma^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} p_0 V. \quad (2)$$

Если скорость поршня больше скорости звука в газе, то реальная кинетическая энергия поршня значительно меньше A_m , так как в равновесном расширяющемся газе давление не успевает выравняться. Можно, однако, существенно увеличить энергию поршня и приблизить ее к A_m , используя вместо одного газа гетерогенную систему двух газов, если в качестве второго взять более легкий газ (с меньшей молекулярной массой). Даже в том случае, когда начальное давление во втором газе намного меньше, чем в первом (а значит, метание с помощью только этого газа менее эффективно), добавление второго газа к первому ускоряет выравнивание давления в системе (скорость звука в более легком газе больше) и повышает скорость метания.

В настоящей работе справедливость этих положений подтверждена результатами численного решения модельной задачи о метании системой двух газов, а также решена задача оптимизации этой системы.

Начальная конфигурация системы дана на рис. 1. Задача расчета одномерного течения вязкого нетеплопроводного газа решалась численно методом Годунова [1]. На рис. 2 показана зависимость конечной скорости поршня от $\beta = M_2/M_1$ для двух значений величины $\alpha = m/(M_1 + M_2)$, где m — масса поршня. При расчете использовались следующие параметры системы: начальные давления $p_1 = 0,5$ ГПа, $p_2 = 0,23$ ГПа, показатель адиабаты обоих газов $\gamma = 1,2$, начальные скорости звука $c_1 = 1040$, $c_2 = 1640$ м/с, $m = 0,003$ кг, полная длина трубы $l = 6$ м, диаметр трубы $d = 0,008$ м. Кривые 1, 2 соответствуют системе, показанной на рис. 1. Для сравнения кривыми 3, 4 приведены аналогичные зависимости для системы, получающейся, если газы 1 и 2 поменять местами. Из рис. 2 видно, что в первом случае скорость метания значительно повышается с ростом доли легкого газа, а во втором изменении и невелико.

Интересно найти оптимальные параметры двухгазовой системы, обеспечиваю-

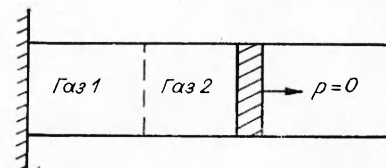


Рис. 1. Начальная конфигурация системы.