

7. L. F. Trueb. J. Appl. Phys., 1969, **40**, 2986.
8. А. П. Мантарошин, П. О. Пашков, И. М. Рядинская. ФММ, 1968, **26**, 1041.
9. Р. Г. Мак-Куин, С. П. Марш. Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., «Мир», 1965.
10. A. H. Holzman, C. R. Cowan. Response on metals to high velocity deformation, N. Y., "Interscience", 1960.
11. M. F. Rose, T. L. Berger, M. C. Inman. Trans. Met. Soc. AIME, 1967, **239**, 1998.
12. L. M. Clarebrough, M. E. Hargreaves, M. H. Loretto. Phil. Mag., 1961, **6**, 807.
13. В. Н. Сикоров, Я. С. Уманский, Г. Н. Эпштейн. Изв. вузов, Черная металлургия, 1971, **11**, 143.
14. J. Till, Ph. D. Thesis. University of Liverpool, 1968 (по сообщению [5]).
15. W. Bollmann. J. Inst. Metals, 1959, **87**, 439.
16. И. Н. Кидин, М. А. Штремель. Кристаллография, 1962, **7**, 899.
17. L. E. Murr, H. R. Vydyanath. Acta met., 1970, **18**, 1047.
18. L. E. Murr, H. R. Vydyanath. Scripta met., 1970, **4**, 183.
19. В. Н. Сикоров. Канд. дисс. Московский институт стали и сплавов. М., 1973.

УДК 539.63 : 549.514.51

ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ. I. КВАРЦ

*А. В. Ананьин, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин,
С. В. Першин, В. Ф. Таций
(Москва)*

Кварц был одним из первых объектов вообще и первым окислом в частности, на кривой ударной сжимаемости которого был обнаружен излом, обусловленный быстрым превращением в плотную модификацию.

В работе [1] показано, что динамический предел прочности кварца зависит от толщины образца, амплитуды входящей в него ударной волны и кристаллографической ориентации, достигая максимального значения 144 кбар для z -направления. Расчетная температура в этот момент составляла 203°С. Вплоть до 383 кбар кривая ударной сжимаемости отражает сосуществование кварца и образовавшегося стиповерита. Согласно [2], лишь выше 450 кбар вещество за фронтом ударной волны соответствует чистому стиповериту.

Исследование сжимаемости кварца смесевым методом [3] показало, что в условиях объемного ударного сжатия излом на адиабате имел место лишь при 200 кбар и 300°С. Экстраполяция верхней ветви ударной адиабаты к нулевому давлению давала значение удельного объема, соответствующее коэситу.

Фоулес [4] нашел, что динамические пределы прочности для осей x и y соответствуют 55—85 кбар, а для оси z — 100—150 кбар. Он сделал вывод о том, что прочность кварца при ударном сжатии достигает теоретической величины, а переход от упругого сжатия к объемному имеет не пластический характер, как в металлах, а аналогичен хрупкому разрушению (рис. 1).

Трунин с сотр. [5—7] показали, что ударные адиабаты монокристаллического кварца и поликристаллических образцов заметно различа-

ются, а удельные объемы, к значениям которых экстраполируются верхние ветви кривых ударной сжимаемости, существенно зависят от начальной плотности исследуемых образцов, колеблясь между величинами, характерными для коэсита и стиповерита. Эти же авторы остроумно объяснили постоянство скорости волны в переходной области ударной адиабаты кварцита (120—330 кбар), сделав предположение о том, что двухступенчатое ударное сжатие кварца до какого-либо давления резко снижает степень превращения в плотные фазы по сравнению с одноступенчатым сжатием. Это обстоятельство должно приводить к слиянию упругой и пластичной волн, если они образуются в переходной области.

Ряд авторов исследовали образцы кварца, сохраненные после ударного сжатия. Вакерли [1] показал, что после ударного сжатия до 250 кбар кварц дробится, но не изменяет структуры, а после сжатия до 500 кбар он полностью превращается в стекло. На основании этих данных в [2] было сделано предположение о том, что фазой высокого давления является не стиповерит, а плотное стекло со структурой, близкой к стиповериту. К аналогичным выводам пришел Дэвис [8], который, обработав данные Трунина с сотр., показал, что температура коэситоподобной фазы, образующейся при сжатии пористого кварца, составляет около $10\,000^\circ\text{C}$. Очевидно, именно это обстоятельство явилось причиной того, что в лабораторных условиях после ударного сжатия удалось отметить образование лишь единичных микроскопических кристалликов коэсита и стиповерита [9—11], в то время как в кратерах гигантских метеоритов эти фазы были найдены [12—15]. Особо следует отметить, что, согласно [15], плотные фазы в образцах из кратера Рис располагались в стекловидных плоскостях диаплектического кварца (слоистый конгломерат обычного кварца и кварцевого стекла).

Настоящая работа была поставлена с целью уточнить механизм превращений кварца при ударном сжатии.

Образцы кварца в виде дисков диаметром 12 и высотой $3,2 \pm 0,2$ мм были вырезаны из природного монокристалла перпендикулярно осям x или z , (соответственно x - или z -срезы), вдоль которых осуществлялось ударное сжатие. Диски плотно прилежали к внутренним поверхностям стальных или медных ампул сохранения (рис. 2). Ударные волны (УВ) генерировались с помощью накладного заряда взрывчатого вещества (ВВ) или ударом алюминиевой пластинки, разогнанной продуктами взрыва, по крышке ампулы, на глубине 10 мм от которой располагался

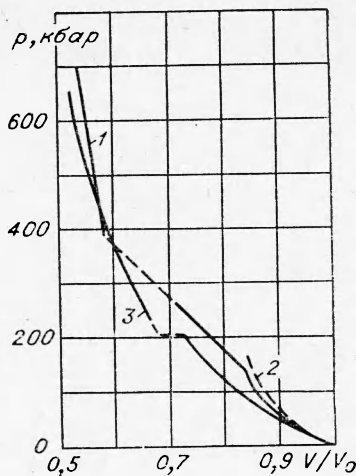


Рис. 1. Сжимаемость кварца.

1 — ударная сжимаемость монокристаллов [1]; 2 — гидростатическая сжимаемость [1]; 3 — ударно-волновая адиабата, полученная смешевым методом [3].

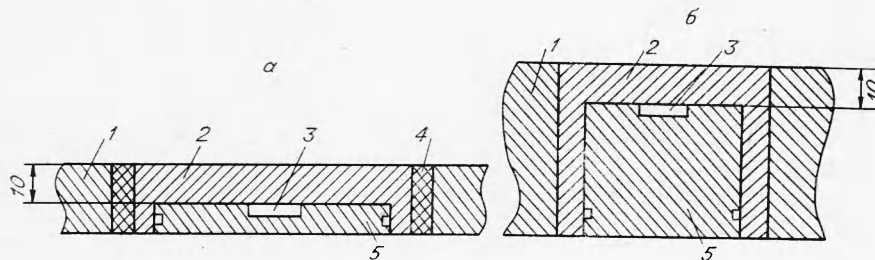


Рис. 2. «Слабая» (а) и «жесткая» (б) ампулы сохранения.

1 — охрannое кольцо; 2 — крышка ампулы; 3 — сохраняемое вещество; 4 — свинец; 5 — дно ампулы.

Условия ударного нагружения образцов кварца в ампулах сохранения

Генератор УВ	Давление в материале ампулы при подходе УВ к образцу кварца, кбар	Давление первой УВ, входящей в образец из крышки ампулы сохранения
<i>Стальная ампула (Ст. 3)</i>		
Ударник II (Al, 4 мм; 3,8 км/с)	670	315
Ударник I (Al, 2 мм; 5,82 км/с)	617	296
Гексоген (1,72 г/см ³)	370	196
Тротил/гексоген (50/50, 1,64 г/см ³)	290	162
Тротил (1,59 г/см ³)	210	122
Тротил (1,4 г/см ³)	155	84
Тротил (1,3 г/см ³)	140	74
Тротил/тальк 80/20 (1,4 г/см ³)	120	58
Тротил/тальк 70/30	110	53
Тротил/тальк 60/40	100	48
Тротил/тальк 50/50	90	44
Тротил/тальк 30/70 (1,31 г/см ³)	60	28
<i>Медная ампула</i>		
Ударник I	780	335
Гексоген (1,72 г/см ³)	415	200
Тротил (1,59 г/см ³)	270	135
Тротил (1,3 г/см ³)	182	90

исследуемый образец. В контактных зарядах ВВ диаметром 100 и высотой 50 мм детонация инициировалась специальным генератором плоской УВ. Давление ударного сжатия варьировалось использованием различных ВВ, спрессованных до разных плотностей (см. таблицу). Давление выше 600 кбар в стали получали с помощью алюминиевых ударников толщиной 2 и 4 мм, разогнанных до скоростей 5,82 (ударник I) и 3,8 (ударник II) км/с соответственно. Следует сразу отметить, что УВ, входящая из металла на границу с кварцем, в случае использования высокоскоростной тонкой пластины, имеет амплитуду меньшую, чем в случае относительно низкоскоростной толстой пластины. Это объясняется более быстрым приходом волны разрежения с тыльной стороны тонкой пластины, более крутым профилем этой волны и, поэтому, более быстрым затуханием волны с расстоянием.

Оценка давления в проходящей по образцу УВ проводилась с использованием ударных адиабат железа [16], меди [17] и кварца [1] в p , u -координатах по методу отражения [18]. Для этого исходные давления в металлах на глубине 10 мм, соответствующей положению границы металл — кварц в опытах по сохранению ударно-сжатых образцов, определялись в специально проведенных опытах. При давлениях выше 360 кбар для расчета давления в меди «откольным» методом [19] регистрировалась скорость свободной поверхности, а в стали — скорость УВ. В обоих случаях временные интервалы регистрировались двумя осциллографами ОК-15М с использованием электроконтактных датчиков. В остальных случаях в металлах с помощью манганиновых датчиков давления [20] регистрировался профиль давления УВ. При измерении скоростей ударных волн и свободной поверхности отклонение значений, измеренных в серии из 5 опытов, от среднего не превышало 2%, а в случае измерения давлений манганиновым датчиком в серии из 3 опытов — 6%.

Достоверность давлений на границе металл — кварц, определенных построениями в p , u -координатах, в разных случаях различна. Вполне достоверными являются давления, определенные пересечением ударных адиабат кварца с изэнтропами расширения меди во всем диапазоне исследований и с изэнтропами расширения железа с давления 130 кбар и ниже. Во всех случаях изэнтропы расширения металлов строились как зеркальные отражения ударных адиабат.

Выше давления 130 кбар ударно-сжатое железо претерпевает фазовое превращение [16], и его изэнтропы расширения не совпадают с зеркальным отражением ударной адиабаты. Это несовпадение, вызванное прочностью ударно-сжатой стали и гистерезисом обратимого превращения, невелико и не приводит к значительным ошибкам в оценке давления на границе сталь — образец. Тем не менее, оценка конечного давления в образце, находящемся в стальной ампуле сохранения, для диапазона давлений 130—360 кбар представляет значительные трудности. В этом диапазоне УВ в стали становится неустойчивой и распадается на две, первая из которых имеет скорость 5,05 км/с и несет давление 130 кбар. Скорость второй более медленной волны, осуществляющей фазовое превращение, зависит от ее амплитуды. При выходе первой УВ на границу с образцом по кварцу распространяется ударная волна с амплитудой 64 кбар, а назад по стали — волна разрежения, которая взаимодействует со второй УВ в железе, снижая ее параметры. Вычислить затухание второй УВ в результате этого взаимодействия к моменту ее выхода на границу с кварцем не представляется возможным. Предполагалось, что отличие от данных, полученных в опытах с манганиновым датчиком [20], невелико.

Другим допущением, использовавшимся при оценке давлений, была незначительность различий ударных адиабат однократного и двукратного сжатия кварца. Результаты проведенных оценок как для первой волны, входящей в кварц, так и для максимального давления, которое имело бы место, если бы образец кварца был бесконечно тонким, приведены в таблице. Полный анализ картины сжатия в условиях, когда расщепление ударной волны имеет место и в материале ампулы и в исследуемом образце, чрезвычайно сложен. Однако, если время действия УВ в несколько раз превышает время однократного прохождения фронта ударной волны (ФУВ) через образец и обеспечивается многократность отражений, можно утверждать, что максимальное давление в образце немного меньше максимального давления в металле рядом с образцом. В наших опытах с использованием накладных зарядов это условие соблюдалось. В случае же нагружения ампул алюминиевыми ударниками конечное давление в образце было существенно ниже давления в металле, и значения, которые приводятся в таблице для этих случаев, могут рассматриваться только как предельные. В дальнейшем будут указываться как амплитуда первой ударной волны, входящей в кварц (без учета расщепления в стали), так и давление в материале ампулы при подходе к кварцу (в скобках).

Изменение свойств веществ после ударного воздействия может определяться не только интенсивностью УВ, но и степенью конечной деформации образца. Для оценки влияния этого фактора сопоставлялись результаты, полученные в обычных «слабых» ампулах (рис. 2, а) и в упругих «жестких» ампулах (рис. 2, б).

Учитывая, что в соответствии с [21] на результаты экспериментов существенное влияние может оказывать не только амплитуда УВ, но и знак кривизны фронта ударной волны, были поставлены специальные опыты по проверке влияния этого фактора. С этой целью результаты, полученные в экспериментах, когда ФУВ был сильно выпуклым (рис. 3, а), сопоставлялись с результатами воздействия детонации заряда такой формы, что фронт УВ при входе в кварц был вогнутым, при-



Рис. 3. Фотохронограммы фронта ударной волны, полученные методом вспыхивающего воздушного зазора в щелевом режиме.

ские исследования проводились на установке [22], позволявшей изучать образцы весом до $1 \cdot 10^{-5}$ г и регистрировать тепловые эффекты величиной $2 \cdot 10^{-6}$ кал. Точность определения ΔH -перехода для $\beta - \alpha$ -превращения кварца составляла 7–10%.

Изменение пикнометрической плотности образцов в зависимости от величины динамического давления отражено на рис. 4. Использование «слабых» ампул приводит к существенному уменьшению плотности при значительно более низких давлениях. Влияние знака кривизны ФУВ практически не сказывается на плотности сохранных образцов. Изменение предварительной ориентации монокристаллов кварца относительно ФУВ не влияло на результаты. Примечательно, что даже после сжатия до давления 296 (617) кбар плотность материала остается близкой плотности кварца.

Данные об изменении пикнометрической плотности хорошо согласуются с результатами рентгенографического и ИК-спектрального исследований. Рентгенограммы всех образцов не содержали каких-либо новых отражений. На рентгенограмме образца после 315 (670) кбар отражения выше 65° были размыты (рис. 5). Аналогичная картина наблюдалась и для ИК-спектров. По мере усиления динамического воздействия, начиная со 196 (370) кбар, становилось заметным размытие полос поглощения, достигающее максимума при 315 (670) кбар, когда ИК-спектр образца становился тождественным спектру обычного кварцевого стекла (рис. 6).

По данным микрокристаллооптического анализа в «слабых» ампулах стекло обнаруживалось, начиная с 74 (140) кбар, а в «жестких» — с 84 (155) кбар. Тем не менее, и этот метод исследования подтверждает, что вплоть до 296 (617) кбар образцы, сохранные в «жестких» ампулах, в основном состоят из кварца (в «слабых» ампулах стеклование заканчивается значительно раньше).

Образец, полученный при 296 (617) кбар, представлял особый интерес. Он состоял из смеси изотропных кристаллов с показателями преломления от 1,458 (плавленный кварц) до 1,494 и слабоанизотропных кристаллов

чем к моменту входа отмечалось образование маховского диска с диаметром около 5 мм (рис. 3, б). Естественно, это должно было приводить к усилению воздействия.

После ударного сжатия образцы извлекались из ампул, измельчались в стальной ступке, промывались кислотами и исследовались. Термографиче-

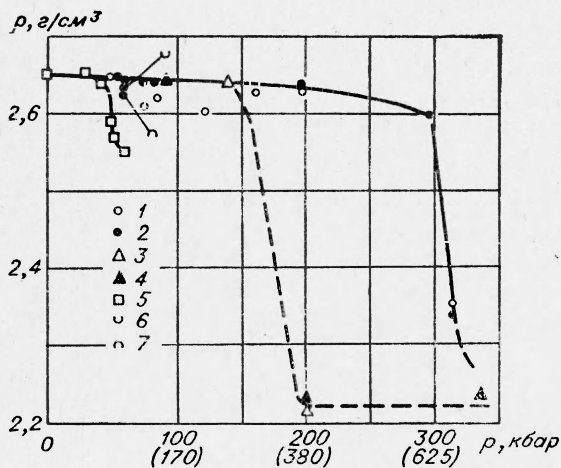


Рис. 4. Пикнометрическая плотность образцов кварца после сжатия УВ различной амплитуды. (Шкала давлений соответствует амплитудам волн, входящих в кварц; в скобках даны давления в стали перед выходом волны в кварц).

1 — x-срез; 2 — z-срез (стальная ампула); 3 — x-срез; 4 — z-срез (медная ампула); 5 — «слабая» ампула, кристаллы не ориентированы; 6 — ударная волна с выпуклым фронтом; 7 — ударная волна с вогнутым фронтом.

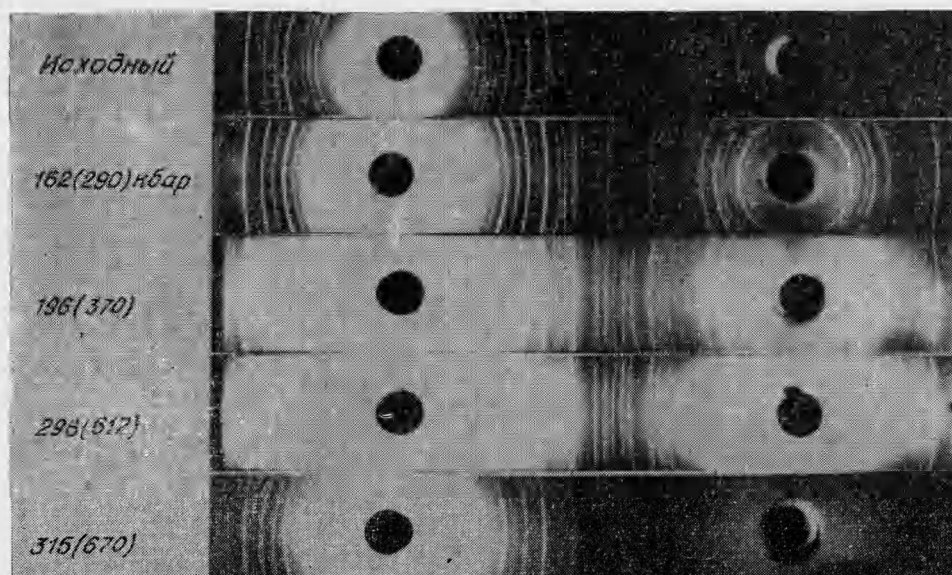


Рис. 5. Рентгенограммы сохраненных образцов кварца.

с показателями преломления от 1,499 до 1,516 (для кварца $N_g=1,553$, $N_p=1,544$). Некоторые из этих анизотропных кристаллов отчетливо проявляли слоистую структуру с чередованием анизотропных и изотропных слоев (так называемый диаплектический кварц, отмеченный, как говорилось выше, в породах из кратера метеорита Рис. [15]). Так как изотропные частицы с повышенным показателем преломления не изменялись после отжига, создается впечатление, что они также представляют собой конгломерат хаотически расположенных микрокристалликов кварца с размером частиц меньше длины волны и обычного кварцевого стекла в отличие от диаплектического кварца, где частицы кварца сильно текстурированы. Образец, полученный при 315 (670) кбар, в основном состоял из изотропной фазы, имеющей показатель преломления выше, чем у обычного чистого кварцевого стекла с небольшой примесью (1—3 процента) кварца. Показатель преломления этого стекла при отжиге также не уменьшался.

Таким образом, согласно перечисленным данным, все сохраненные образцы представляли собой смесь кварца с кварцевым стеклом, причем резкое увеличение стеклообразования начиналось с 296 (617) кбар. Однако результаты термографического исследования, казалось бы, противоречат этому выводу.

На рис. 7 представлены результаты определения теплоты $\beta-\alpha$ -перехода кварца. Несмотря на существенный разброс данных, видно, что для «жестких» ампул сохранения удельная теплота перехода начинает уменьшаться с 58 (120) кбар и падает до нуля при 162 (290) кбар. Таким образом, по данным пикнометрии, рентгенографии, ИК-спектроскопии и микрокристаллоскопии

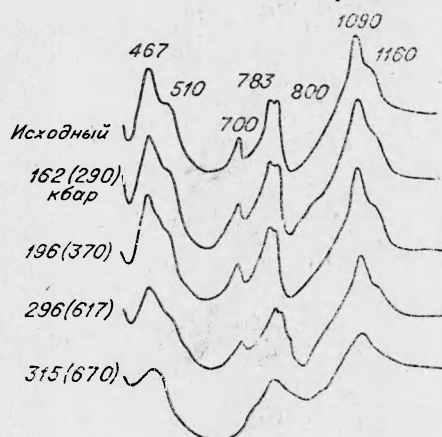


Рис. 6. ИК-спектры сохраненных образцов кварца.

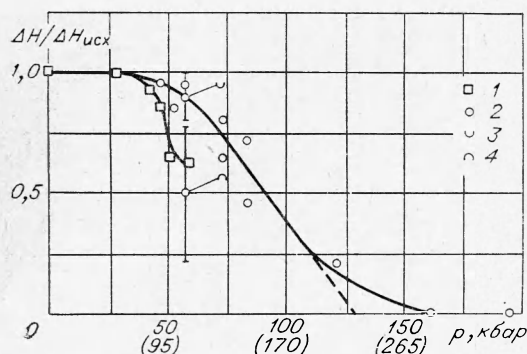


Рис. 7. Зависимость энтальпии β — α -перехода кварца от давления ударного сжатия.
1 — «слабая» ампула; 2 — «жесткая» ампула; 3 — УВ с выпуклым фронтом; 4 — УВ с вогнутым фронтом и маховским диском.

извлекался и из него делалось два петрографических шлифа — параллельно и перпендикулярно направлению прохождения фронта УВ. На рис. 8 приведена микрофотография шлифа, вырезанного параллельно оси x (перпендикулярно фронту УВ), полученная в проходящем поляризованном свете. Отчетливо видно, что после прохождения ударной волны и охлаждения образец раздробился на блоки (5—20 мк) кварца, разделенные прослойками кварцевого стекла. Кристаллические блоки, очевидно, сохраняют прежнюю ориентацию, так как при повороте столика микроскопа погасают в поляризованном свете практически одновременно. Размер блоков в шлифе, вырезанном перпендикулярно оси x , т. е. перпендикулярно направлению движения УВ, существенно больше (100—200 мк).

Полученные данные означают, во-первых, что переход одноосного сжатия кварца к объемному происходит путем его дробления на блоки, которые затем смещаются относительно друг друга, слабо изменяя свою первоначальную ориентацию. Аналогичные выводы были сделаны авторами [23] для менее прочных чем кварц монокристаллов. Рентгеногра-

после сжатия до 162 (290) кбар образцы почти нацело состоят из кварца, а термографически он не регистрируется. Не проявляется термический эффект, соответствующий β — α -переходу, и после воздействия более высоких давлений.

Для уточнения причин этого явления был проведен следующий эксперимент. Ударному сжатию по оси x до 58 (120) кбар подвергался монокристаллический диск кварца. Затем ампула осторожно вскрывалась, образец пропитывался канадским бальзамом,

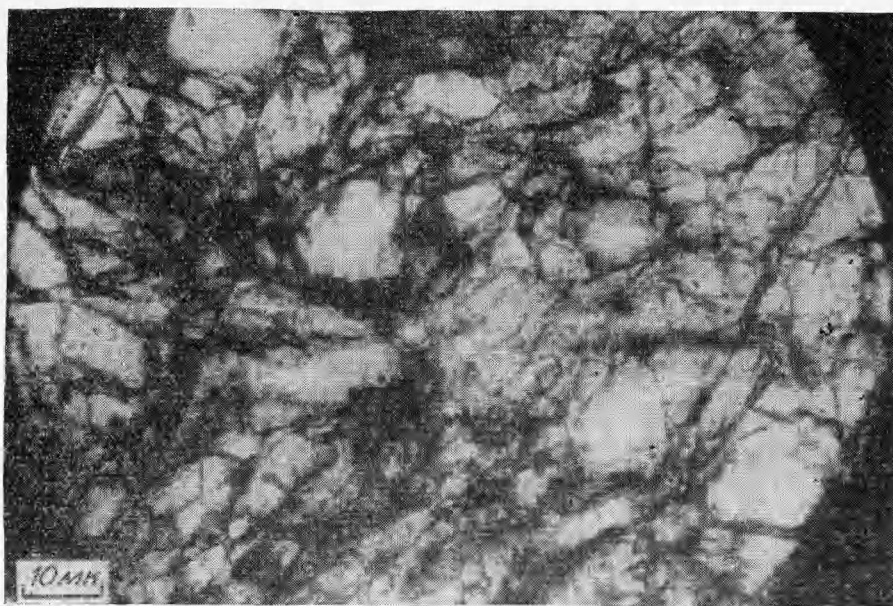


Рис. 8. Микрофотография монокристалла кварца после воздействия УВ в направлении оси x .

фическое исследование монокристаллов фтористого лития, алюминия и графита непосредственно за ФУВ показало, что кристаллическая ориентация при переходе от одноосного сжатия к объемному сохраняется [23].

Во-вторых, трение блоков при их взаимном смещении приводит к резкому повышению температуры на границах и плавлению кварца. Появление расплава кварца резко снижает среднюю вязкость среды и обеспечивает подход к объемному сжатию оставшихся частиц кварца.

В-третьих, дробление исходного монокристалла кварца протекает преимущественно в направлениях, близких к плоскости фронта УВ. Этот вывод хорошо согласуется с [24], где показано, что при ударном сжатии монокристаллов хлористого натрия электропроводность за фронтом ударной волны в направлении, параллельном фронту, может быть на два порядка больше, чем в перпендикулярном направлении. Такой результат легко объяснить, если принять, что увеличение электропроводности связано с плавлением вещества, а слои расплава, разделяющие образующиеся блоки, ориентируются в основном параллельно фронту УВ. Такое предположение естественно, так как для обеспечения перехода от одноосного сжатия к объемному требуется смещение частиц вещества не вдоль направления движения волны, а поперек.

Поведение кварцевых блоков и расплавленных прослоек при дальнейшем повышении давления, очевидно, различно. Кварцевые блоки в условиях возникшей объемности сжатия не испытывают никаких превращений, по крайней мере до 196 кбар, как следует из ударной адиабаты, полученной смесевым методом [3], и сохраняются практически неизменными после прохождения волн разгрузки. Возможно, конечно, их частичное или даже полное плавление, если остаточные температуры будут достаточно высоки. В расплавившемся же кварце изменение ближней координации атомов может протекать неизмеримо быстрее, и именно расплавленная часть, доля которой непрерывно возрастает по мере увеличения давления, ответственна за излом на ударной адиабате Вакерли, вызванный одновременно протекающими процессами перехода от одноосного сжатия к объемному, и изменения строения расплавленной части. Именно этим обстоятельством обусловлен, очевидно, тот факт, что огибающая кривых ударной сжимаемости кварца, согласно Вакерли [1], проходит левее кривой объемного сжатия, так как эта огибающая соответствует полному завершению перехода от одноосного сжатия к объемному, а следовательно, и превращению образующегося при этом кварцевого стекла в коэситоподобное и стиповеритоподобное.

Следует отметить, что переход двуокиси кремния в плотные стеклообразные формы происходит в наиболее нагретых областях образца — расплавленных прослойках между кристаллическими блоками. Это приводит к тому, что после прохождения волн разгрузки плотные фазы легко отжигаются и могут сохраниться только после длительного действия высоких давлений, например при падении гигантских метеоритов. В этих условиях кристаллы коэсита и стиповерита могут существенно укрупниться и повысить свою термическую стабильность, а их температура может существенно снизиться за счет теплообмена с более холодными кристаллами непревратившегося кварца. Тот факт, что и коэсит и стиповерит из метеоритных кратеров образуются именно в прослойках кварцевого стекла в диаплектическом кварце, подтверждает сделанные выводы.

Как уже упоминалось, авторы [7] предположили, что двухступенчатое сжатие кварца резко снижает степень его превращений в плотные фазы по сравнению с одноступенчатыми. Полученные результаты подтверждают справедливость такого предположения. Действительно, фронт каждой последующей волны обладает обычно меньшей крутизной, чем фронт первой входящей в образец УВ. Следовательно, максимальные

градиенты давлений следует ожидать именно в первой волне. Чем они больше, тем сильнее будет дробиться исходный монокристалл и тем больше будет доля жидкой фазы. Последующие ударные волны могут, очевидно, разрушить кварцевые блоки, образовавшиеся в первой волне только нагреванием, которое также существенно больше при одноступенчатом сжатии до того же давления. Действительно, использование медных ампул сохранения, обеспечивающих вхождение одноступенчатой волны, резко усиливает процессы стеклования (см. рис. 4).

Сказанное выше вновь заставляет обратить внимание на картину ударно-волнового нагружения образцов в стабильных (Ст. 3) ампулах сохранения. Как уже говорилось, если давление в стали составляет от 130 до 360 кбар, первая УВ, входящая в кварц, всегда будет иметь одну и ту же амплитуду — 64 кбар. Это означает, что начиная с давления в стали 130 кбар фазовый состав сохраненных образцов в большом интервале давлений должен быть почти одинаков, так как практически все необходимые изменения производит только первая волна. Затем на свойствах сохраненных образцов должен сказаться скачок плотности, регистрируемый при изучении ударной сжимаемости смесевым методом при 196 кбар (или, в соответствии с характером нагружения в ампулах сохранения, — при 115 (200) кбар). Действительно, β — α -переход кварца перестает регистрироваться термографически около 127 (210) кбар (см. рис. 7). Однако остается непонятным, почему образцы даже после 296 (617) кбар состоят почти полностью из кристаллического кварца.

Устранить это кажущееся противоречие между результатами измерения ударной сжимаемости и исследованием сохраненных образцов помогает работа [25], авторы которой исследовали особенности плавления кварца под давлением. Широко распространено мнение, что кристаллизация кварцевого стекла протекает неизмеримо медленнее, чем плавление кварца. Оказалось, что если при плавлении кварца тем или иным способом обеспечивается сохранение его исходного химического состава, в частности предотвращается удаление структурно связанной воды, то расплав при охлаждении ниже 1870, 2150 или 2360°С для давлений 1 бар, 7 или 12 кбар соответственно, кристаллизуется практически мгновенно.

Условия плавления кварца в ампулах сохранения, по-видимому, не приводят к деструктурированию влаги, если не имеют места пластические течения, и кварц, превратившийся выше 196 кбар в плотное стекло из кристаллических блоков, сжимавшихся объемно, оказывается способным к быстрой кристаллизации. Усиление же пластических течений (прослойки между блоками, общая деформация образца в «слабых» ампулах при малых давлениях и в «жестких» — при больших) делает процесс стеклования необратимым, так как ускоряет сегрегацию воды, например, по механизму, предложенному для диффузионных процессов в ударных волнах в [11].

Таким образом, стекловидные прослойки, образующиеся при дроблении кварца, появляются после преодоления его динамического предела текучести. Это приводит к возникновению существенных и неравномерных внутренних напряжений в образующемся диаплектическом кварце, так как плотность кварцевого стекла (2,2 г/см³) заметно ниже плотности кварца (2,65 г/см³) и более плотных форм двуокиси кремния, из которых обычное кварцевое стекло образуется при отжиге за счет остаточных температур. В то же время известно [26], что температура β — α -перехода заметно зависит от давления, увеличиваясь на 26 град/кбар. Было показано специальными экспериментами, что температурный интервал, в котором происходит это превращение в обычных условиях, не превышает 0,05°С. По-видимому, возникновение неравномерных внутренних напряжений, величина которых в таких прочных веществах как кварц и кварцевое стекло может достигать нескольких кбар, приводит

к тому, что каждая микро-область образца претерпевает переход при своей собственной температуре, суммарный эффект «размазывается» и перестает регистрироваться термографически.

После прохождения ударной волны образец представляет собой гетерогенную смесь расплава и дисперсного кварца. Это подтверждает такой опыт. Ударному сжатию в ампуле сохранения, заполненной парафином, подвергалось несколько разделенных между собой кусочков кварца, которые размещались в верхней части ампулы. После ударного

сжатия в нижней части ампулы было обнаружено монолитное стеклокристаллическое образование, покрытое слоем продуктов термического разложения парафина. Внутри монолита продуктов крекинга не было.

Величина теплового эффекта $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения оказалась чувствительной к знаку кривизны фронта ударной волны. Образцы, подвергнутые действию выпуклого фронта УВ, практически не отличались от обычных. В то же время образцы после действия волны с маховским диском были значительно более неоднородны (см. величину разброса точек на рис. 7) и давали в среднем значительно более слабый эффект. Следует напомнить, что по плотности, т. е. по содержанию кристаллического кварца, эти образцы отличались мало (см. рис. 4). Причина этого ясна из сказанного выше.

Степень измельчения кварца в зависимости от интенсивности ударного сжатия характеризовалась по величине удельной поверхности порошков, полученных измельчением сохраненных образцов в стандартных условиях. Предполагалось, что чем больше внутреннее напряжение в образце, тем сильнее он должен измельчаться при механическом воздействии. С другой стороны, уменьшение размера частиц, составляющих двухкомпонентную композицию, обычно приводит к увеличению прочности последней. Поэтому следовало ожидать, что искомая зависимость должна иметь экстремальный характер.

На рис. 9 приведены результаты определения удельной поверхности методом БЭТ по адсорбции криптона. Данные, полученные для случайно ориентированных образцов, ложатся на график бессистемно. В то же время предварительная ориентация исходных монокристаллов таким образом, чтобы направление ударного сжатия совпадало с осями x или z , позволила показать, что степень измельчения приблизительно обратно пропорциональна величине динамического предела прочности в направлении удара. Действительно, увеличение удельной поверхности после сжатия в направлении x в 1,9—2,3 раза больше, чем для оси z . Отношение значений динамических пределов прочности в этих направлениях соответственно $(55 \div 85) : (100 \div 150) \approx 1 : 1,8$.

Результаты проведенной работы позволяют сделать следующие выводы.

1. При исследовании свойств образцов кварца, сохраненных после воздействия ударных волн различной интенсивности, показано, что необратимое стеклование кварца определяется не только величиной динамических давлений, но и деформацией образцов, зависящей от конструкции ампул сохранения.

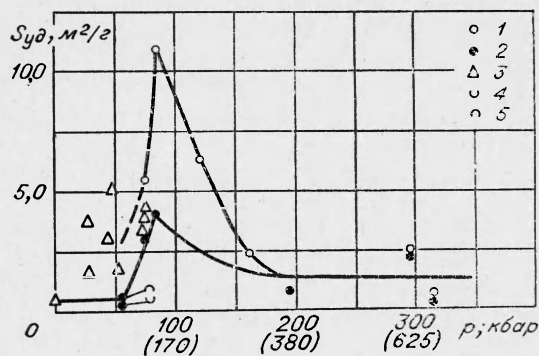


Рис. 9. Удельная поверхность образцов кварца, сохраненных после воздействия УВ и измельченных в стандартных условиях.

1 — x -срез; 2 — z -срез («жесткая» ампула); 3 — случайная ориентация кристаллов; 4 — УВ с выпуклым фронтом; 5 — вогнутая УВ с маховским диском.

2. Переход сжатия кварца от одноосного к объемному связан с дроблением исходного монокристалла на блоки и образованием расплавленных прослоек между блоками, т. е. сопровождается возникновением больших температурных градиентов в образце.

3. По мере усиления ударного воздействия энтальпия $\beta \rightarrow \alpha$ -перехода кварца уменьшается, и после достижения пикового давления порядка 200 кбар этот переход термографически не регистрируется, несмотря на то, что сохраненные образцы практически нацело состоят из кварца.

4. Сопоставление полученных результатов с данными об ударной сжимаемости кварца приводит к предположению, что процессы уплотнения, регистрируемые ударно-волновой техникой, связаны лишь с расплавляющейся частью кварца, а кристаллические блоки остаются неизменными до тех пор, пока средняя температура ударного сжатия не превысит температуру плавления кварца. Если нет заметных макропластических деформаций, то расплав способен к быстрой кристаллизации при охлаждении.

В заключение авторы благодарят Н. А. Опейкину, Л. В. Журав и В. Е. Чемагина за помощь в работе.

*Поступила в редакцию
12/X 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Wackerly. J. Appl. Phys., 1962, **33**, 3, 922.
2. R. G. McQueen, J. Fritz, S. P. Marsh. J. Geophys. Res., 1963, **68**, 8, 2319.
3. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин и др. ПМТФ, 1962, 4, 81.
4. R. Fowles. J. Geophys. Res., 1967, **72**, 22, 5729.
5. Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков и др. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1971, 1, 13.
6. Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков, М. А. Подурец. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1971, 2, 33.
7. М. А. Подурец, Р. Ф. Трунин. Докл. АН СССР, 1970, 4, 811.
8. G. F. Davis. J. Geophys. Res., 1972, **77**, 26, 4920.
9. P. S. DeCarly, D. J. Milton. Science, 1965, **165**, 144.
10. А. А. Дерибас, Н. Л. Добрецов и др. Докл. АН СССР, 1966, **168**, 665.
11. А. Н. Дремин, О. Н. Бреусов. Усп. химии, 1968, **37**(5), 898.
12. E. C. Chao, E. M. Shoemaker, B. M. Madsen. Science, 1960, **132**, 220.
13. E. C. Chao, J. J. Fahey а. о. J. Geophys. Res., 1962, **67**, 1, 419.
14. A. J. Cohen, T. E. Bunch, A. M. Reid. Science, 1961, **134**, 1624.
15. D. Stöffler. J. Geophys. Res., 1971, **76**, 23, 5474.
16. D. Bancroft, E. Peterson, S. Minshall. J. Appl. Phys., 1956, **27**, 3, 281.
17. Л. В. Альтшулер, М. И. Бражник, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1971, 6.
18. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник. ЖЭТФ, 1958, **34**, 4, 886.
19. А. Н. Дремин, Г. А. Ададунов. Докл. АН СССР, 1959, **128**, 2611.
20. А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ФГВ, 1973, 9, 3.
21. В. В. Бражнев, З. М. Гелунова, П. О. Пашков. Металловедение и прочность материалов. Волгоград, 1970, стр. 150.
22. О. Н. Бреусов, В. Н. Дробышев, В. Ф. Таций. Зав. лаб., 1971, **37**, 5, 627.
23. J. Quintin, A. C. Mitchell, L. Evans. Appl. Phys., Letters, 1972, **21**, 1, 29—30.
24. Ю. Н. Тюняев, Ю. В. Лисицын и др. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, стр. 591.
25. А. Г. Боганов, С. А. Попов, В. С. Руденко. Докл. АН СССР, 1971, **201**, 5, 1099.
26. R. S. Col, M. S. Paterson, J. Geophys. Res., 1969, **74** (20), 4921.