

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Анисимов, А. В. Бушман, Г. И. Канель и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 9.
2. В. А. Агурейкин, С. И. Анисимов, А. В. Бушман и др. ТФТ, 1984, 22, 5, 964.
3. Ю. Г. Малама. ФГВ, 1984, 20, 4, 117.
4. D. Humes. Proc. Meteor. Hazard Workshop ESA SP-153, 1979.
5. H. Fechtig. Ibid.
6. N. Pailer, E. Grün. Planet. Space Sci., 1980, 28, 3.
7. М. М. Русаков. ПМТФ, 1966, 4, 167.
8. М. М. Русаков, М. А. Лебедев. Космич. исслед., 1972, X, 1, 168.
9. М. М. Русаков, М. А. Лебедев. Космич. исслед., 1968, VI, 4, 634.
10. М. М. Русаков, Б. К. Шейдуллин. Космич. исслед., 1979, XVII, 1, 172.
11. Гэннон, Лашло, Лей, Уолник. РТК, 1965, 11, 148.
12. Г. И. Канель, С. В. Разоренов, В. Е. Фортов. ПМТФ, 1984, 5, 60.

Поступила в редакцию 20/III 1986

УДК 536.424

ОСОБЕННОСТИ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ ДВУОКСИ КРЕМНИЯ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КИНЕТИКИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

*М. А. Подурец, Р. Ф. Трушин
(Москва)*

Изучение ударного полиморфизма в системе кремнезема (SiO_2) вызывает большой интерес, поскольку в ней экспериментально обнаружены значительные отклонения от результатов, предсказываемых условиями фазового равновесия. Это обстоятельство, с одной стороны, открывает пути исследования кинетики фазовых превращений в ударных волнах (УВ), а с другой — налагает определенные ограничения на возможность определения уравнения состояния фаз высокого давления из ударно-волновых экспериментов, поскольку в конечных состояниях имеются остаточные концентрации исходных фаз.

На рисунке представлены результаты по ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов кварца и коэсита в диапазоне давлений до 1 Мбар [1, 2]. Обращают на себя внимание следующие особенности (как согласующиеся с фазовыми диаграммами, так главным образом и не согласующиеся).

1. Переход кварца в стишовит в случае малой пористости ($\rho \geq 1,55 \text{ г/см}^3$) и в коэсит при большой пористости ($\rho \leq 1,15 \text{ г/см}^3$). При $1,12 < \rho < 1,55 \text{ г/см}^3$ наблюдается большая неустойчивость в положении ударных адиабат.

2. Непосредственный переход кварца в стишовит, минуя коэсит, что противоречит последовательности областей стабильности кварца, коэсита и стишовита на фазовой $p-T$ диаграмме. Это утверждение следует не только из анализа хода ударных адиабат, но и подтверждается рентгеноструктурным анализом сохраненных после ударного сжатия образцов. В них обнаруживается стишовит и нет коэсита, несмотря на

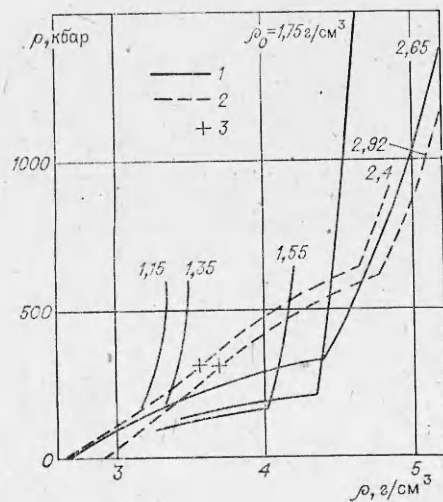


Диаграмма давление — плотность для SiO_2 .
1 — кварц; 2 — коэсит; 3 — состояния, соответствующие началу фазового перехода коэсита.

гораздо более легкий отжиг стишовита в кварц (по сравнению с коэситом) под действием остаточных температур после разгрузки.

3. Переход коэсита в стишовит.

4. Быстрота переходов; характерные времена во много раз (на 10 порядков) меньше времен переходов в статических экспериментах.

5. Отсутствие масштабного эффекта на стишовитной ветви ударной адиабаты кварца. Экспериментально зафиксировано, что положение ударной адиабаты не меняется при изменении толщины образцов [3]. Это могло бы служить доводом в пользу утверждения о фазово-однородных состояниях на крутой ветви. Однако это не так.

6. Имеет место незавершенность перехода с образованием конечных неравновесных состояний; наряду с продуктом реакции — стишовитом в конечных состояниях — имеется заметная доля (до 20%) исходного кварца. Неравновесность установлена по разности наклонов адиабат нагружения и разгрузки из начальных состояний на крутой ветви первой ударной адиабаты кварца [4]. Причина различия наклонов состоит в том, что при динамическом воздействии на вещество (повторном ударном сжатии или при резкой разгрузке) остаточный кварц переходит в стишовит. Из пп. 5 и 6 следует, что реакция фазового превращения протекает в очень узкой зоне за фронтом УВ.

7. Большая по сравнению со статическими экспериментами задержка по давлению перехода кварца в стишовит (120—140 вместо 50 кбар) и еще большая для перехода коэсита в стишовит (300 вместо 60 кбар).

8. Постоянство скорости УВ в области фазового перехода без нестационарного раздвоения фронта. Это означает, что ударная адиабата в точности совпадает с волновым лучом в $p-v$ -плоскости, проходящим через точку первого излома. Представляется очевидным, что это свойство не может быть результатом игры случая, а должно быть объяснено действием достаточно жесткого механизма отбора концентраций легкой и тяжелой фаз, т. е. свойствами кинетики превращения.

Покажем, какими свойствами должна обладать кинетика, чтобы объяснить все перечисленные особенности.

Прежде всего отметим, что совпадение ударной адиабаты с волновым лучом объясняется действием специфического механизма устойчивости УВ, для обеспечения действия которого необходимо, чтобы первая ударная адиабата лежала под волновым лучом, а вторая, исходящая из точки первого излома, лежала бы над ним [5]. На языке кинетики можно сказать, что разбиение одной УВ на две должно резко сокращать наработку тяжелой фазы. Таким образом, определяющим интенсивность кинетики параметром должен быть такой, который резко уменьшается при раздвоении волны. Такой параметр один — сдвиговое напряжение, возникающее во фронте УВ в результате первоначального одноосного деформирования. Благодаря тому, что существует независимый от фазового перехода механизм релаксации сдвиговых напряжений (консервативное движение дислокаций), сдвиговое напряжение перед фронтом второй волны (если она отошла на достаточное расстояние от первой) практически исчезает, во всяком случае, падает ниже порога реакции, и во второй волне реакция может уже идти только на собственных сдвиговых напряжениях второй волны, которые значительно ниже, чем в волне однократного сжатия до тех же давлений, что и при двукратном сжатии. Такие сдвигово-стимулируемые реакции были названы тензогенными [6].

Следующее утверждение заключается в том, что превращение кварца в стишовит осуществляется по мартенситной кинетике или с учетом сказанного выше по тензогенной мартенситной кинетике, причем реакция носит пороговый характер¹. Этим объясняется положение точки первого излома ударной адиабаты кварца, которая лежит далеко в области стабильности стишовита, а не на кривой фазового равновесия.

¹ Оценка для величины порога дает $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 = 15$ кбар.

Мартенситный характер кинетики объясняет быстроту реакции, так как кооперативная перестройка решетки идет со скоростью порядка поперечной скорости звука. Необходимость в сдвиговом напряжении (внешнем по отношению к растущему кристаллу плотной фазы), превышающем пороговое значение, объясняется характером собственной деформации мартенситного превращения кварца в стишовит. Оказывается, что она не имеет инвариантной плоскости, а образующаяся разориентировка (угол $\varphi \sim 18^\circ$) может быть ликвидирована только при наличии в матрице поля сдвиговых напряжений [4].

В противовес динамическим в статических экспериментах не может быть достаточных сдвиговых напряжений; их величина зависит от конкретной конструкции узла высокого давления и не может превышать предела текучести. Последний же для кварца примерно в 2 раза меньше порога фазового перехода. Об этом со всей определенностью свидетельствует динамический эксперимент: на участке ударной адиабаты кварца ниже точки первого излома вплоть до упругого предвестника (амплитуда которого примерно вдвое ниже) фиксируются пластические состояния, распространяющиеся с объемной скоростью звука. Таким образом, в статических условиях фазовые превращения в системе кварц — коэсит — стишовит могут происходить только по диффузионной кинетике с термической активацией переходов. Такие превращения осуществляются очень медленно; характерные времена выдержки образцов достигают десятков минут, при этом часто требуется применение каталитических добавок.

С точки зрения тензогенной мартенситной природы кинетики перехода кварц — стишовит в УВ легко объясняются такие, казалось бы, противоречивые свойства ударной сжимаемости, как незавершенность перехода и отсутствие масштабного эффекта на стишовитной ветви ударной адиабаты. В самом деле, реакция идет тогда и только тогда, когда существуют сдвиговые напряжения. Поскольку их релаксация идет в основном по независимому от фазового перехода механизму, то, во-первых, наработка новой фазы прекращается, как только исчезают сдвиговые напряжения, а, во-вторых, переход осуществляется только в очень узкой зоне, по существу, только во фронте УВ, ширина которого мала по сравнению с любыми размерами используемых образцов.

Причина перехода кварца сразу в стишовит, минуя коэсит, следующая. В ячейке кварца 3 молекулы SiO_2 , а в ячейке коэсита 16. Это означает, что 16 ячеек кварца следует перевести в 3 ячейки коэсита. При этом сильно возрастает роль конечной перетасовки молекул — по существу диффузионного процесса. Поэтому в УВ переход кварца в коэсит может идти только при высоких нагревах, что и имеет место при сжатиях сильнопористых образцов. Для перехода коэсит — стишовит кристаллогеометрическая ситуация более благоприятна, однако и здесь следует из одной ячейки коэсита образовать 8 ячеек стишовита перераспределением молекул внутри одной деформированной нужным образом ячейки коэсита. Следует поэтому ожидать значительного увеличения амплитуды УВ в начале перехода коэсита в стишовит по сравнению со случаем кварц — стишовит.

Эксперимент действительно свидетельствует об этом — давление первого излома увеличивается почти втрое. Конечно, каждый вид кинетики осуществляется в чистом виде только асимптотически: при малых нагревах тензогенная мартенситная, при больших — диффузионная. В промежуточных случаях работают обе. По-видимому, именно такая ситуация наблюдается при фазовых превращениях в кварце промежуточной пористости. Таким образом, в системе кремнезема отмечается заметное влияние кинетики фазовых превращений на ударную сжимаемость исходных фаз. При этом большой интерес представляет выяснение определяющей роли сдвиговых напряжений, стимулирующих реакции, идущие по мартенситному механизму.

Подобное влияние, вообще говоря, не новость. Даже в классических исследованиях на сплавах железа ранее отмечалось, что сдвиговые напряжения могут повысить мартенситную точку, однако в статических условиях не они определяют кинетику. Дело в том, что в этом случае, как сказано выше, невозможно создать большие сдвиговые напряжения, все аппараты высокого давления конструируются так, что сжатие близко к всестороннему, во всяком случае, сдвиговое напряжение в испытываемом образце не может превышать предела его текучести. Поэтому в статических экспериментах невозможны мартенситные реакции с большим порогом по сдвиговому напряжению. Напротив, в условиях ударного сжатия во фронте волны практически мгновенно при одноосном деформировании возникают большие сдвиговые напряжения, релаксирующие со скоростью, сравнимой со скоростью фазового превращения, поскольку оба эти процесса имеют одну и ту же дислокационную природу. И пока существуют сдвиговые напряжения, превышающие порог релаксации, переход происходит.

Представляет интерес поиск других веществ, испытывающих фазовые превращения по тензогенной мартенситной кинетике. По-видимому, к ним принадлежат переходы в системах графит — алмаз и нитрида бора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Ф. Трунин, Г. В. Симаков, М. А. Подурец. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1974, 2, 33.
2. М. А. Подурец, Г. В. Симаков, Г. С. Телегин и др. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1981, 1, 16.
3. М. А. Подурец, Л. В. Попов, А. Г. Севастьянов и др. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1976, 11, 59.
4. М. А. Подурец, Г. В. Симаков, Р. Ф. Трунин. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1976, 3, 3.
5. М. А. Подурец, Р. Ф. Трунин. Докл. АН СССР, 1970, 195, 4, 814.
6. А. И. Воронцов, М. А. Подурец. ПМТФ, 1980, 6, 70.

Поступила в редакцию 20/III 1986

УДК 533.6.011.72

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ ДИССОЦИАЦИИ И ИОНИЗАЦИИ ГАЗА

А. С. Барышников, Н. Ю. Васильев, А. Б. Сафонов
(Ленинград)

Широко известны факты возмущенности течения за волной детонации, искаженности и неустойчивости положения ее фронта [1, 2]. Основным условием существования таких аномалий течения можно считать усиление возмущений акустической моды за счет выделения тепла в химических реакциях.

Вместе с тем, на определенных режимах течения подобные аномалии наблюдаются и в случае эндотермических процессов, идущих за ударной волной (УВ): диссоциации и ионизации [3—6]. Проявляются они в образовании вихрей при обтекании затупленных тел [3, 4] и в немонотонности профиля реагирующих компонентов за ионизирующей УВ [4—6]. В любом случае происходит перестройка структуры течения, которая описывается нелинейными уравнениями типа Гельмгольца [7]. Для вихреобразования — это уравнение движения, записанное для вектора завихренности $\vec{\Omega} = \text{rot } \vec{v}$ в общепринятых обозначениях:

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = (\vec{\Omega}\nabla)\vec{v} - \vec{\Omega} \text{div } \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla\rho \times \nabla p + \nu\Delta\vec{\Omega}, \quad (1)$$

где ν — кинематическая вязкость. Для течения за ионизирующей УВ —