

S.S. Batsanov

УДК 662.215.2

С. С. БАЦАНОВ

Fiziko-khimicheskie effektya Deystvi VZR'va  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА  
НА ВЕЩЕСТВО  
na Ve?estvo

Развитие современной физики и техники, а также необходимость моделирования геологических и космических процессов требуют знания поведения неорганических материалов в условиях сверхвысоких температур и давлений. Вместе с тем, в настоящее время стандартные статические установки позволяют получать температуры порядка нескольких тысяч градусов и давления — в сотни тысяч атмосфер. Применение техники взрывного сжатия позволяет существенно поднять пределы давлений и температур и, осуществив высокоскоростную необратимую деформацию вещества, исследовать изменения его свойств.

В настоящем обзоре рассмотрены физико-химические превращения неорганических веществ (неметаллического характера), происходящие в условиях или в результате динамического нагружения.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УДАРНОГО СЖАТИЯ

Ударные волны (УВ) образуются, как известно, при соударении тел, летящих с большой скоростью, или в результате детонации взрывчатых веществ (ВВ). Величина развиваемого при этом давления зависит от геометрии взрывного устройства, плотности исследуемого вещества и скорости распространения в нем УВ. Обычно применяемые в лабораторной практике ВВ при использовании накладного заряда позволяют получать давления от нескольких десятков до сотен тысяч атмосфер (*кбар*). Организация же сходящихся УВ приводит к концентрации энергии, проявляющейся в резком увеличении волновой скорости и соответствующем повышении давлений до миллионов или даже десятков миллионов атмосфер (*мбар*). Температуры, развивающиеся при указанных давлениях, изменяются в очень широких пределах — от нескольких десятков до десятков тысяч градусов, причем они существенно зависят от эффективной плотности и исходной температуры вещества.

Принципиальная особенность ударного сжатия заключается в чрезвычайной кратковременности его действия: благодаря огромным скоростям распространения УВ время действия высоких импульсных давлений и температур колеблется (в зависимости от геометрии эксперимента и свойства вещества) от нескольких десятков долей до десятков микросекунд. После снятия давления тело в результате разгрузки охлаждается, однако не до исходной, а несколько более высокой температуры, которая, в зависимости от сорта и состояния вещества и величины приложенного давления, колеблется от нескольких десятков до тысяч градусов. Дальнейшее охлаждение вещества происходит по обычным законам. Таким образом, спад давления

и температуры тела после его ударного сжатия происходит с различной скоростью (рис. 1).

Не имея возможности останавливаться на количественной стороне описываемых явлений (см. подробнее [1—3]), подчеркнем еще раз главное отличие физики импульсных давлений — если температура и давление в статических установках задаются в основном конструкцией аппарата, то в динамических экспериментах эти же параметры обуславливаются в основном свойствами самого обжимаемого материала. Поэтому, хотя сжатие тела в динамических условиях и обеспечивает гораздо большую, чем в статических условиях, вариацию термодинамических параметров, для определения последних требуется детальное изучение механических свойств каждого вещества.

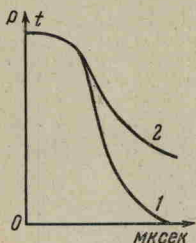


Рис. 1. Схематическое изображение временной зависимости давления (1) и температуры (2) при импульсном нагружении

Вместе с тем, в физико-химическом плане техника УВ обладает существенным достоинством — быстрое снятие высоких давлений и температур часто закаливает систему и позволяет обеспечить сохранение продуктов и состояний, характерных для экстремальных условий.

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ

Прохождение УВ через кристалл сопровождается очень быстрым — порядка нескольких км/сек — перемещением сжатого состояния вещества, причем глубина фронта УВ составляет всего несколько десятков периодов решетки [4]. На границе фронта, благодаря огромному градиенту  $p$  и  $t$ , происходит своеобразное «перемальвание» кристалла и, как следствие, — образование многочисленных дефектов (дислокаций, вакансий и т. п.) решетки.

Если предположить, что размер минимального кристаллического блока-монолита, не подвергающегося дальнейшему дроблению во фронте УВ, составляет  $100 \text{ \AA}$ , то число атомов в нем равно  $\sim 10^3 - 10^4$ . Предполагая, что дислокации возникают на границах этих блоков, получаем, что в объеме  $1 \text{ см}^3$  число дислокаций должно быть  $\sim 10^{18} - 10^{19}$ , а плотность дислокаций —  $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . После снятия импульсной нагрузки за счет остаточного тепла часть дислокаций залечится и их плотность может снизиться на один — два порядка. Таким образом, остаточная плотность дислокаций в ударно-обжатых монокристаллах не должна быть больше  $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Если в результате прохождения УВ через монокристалл произойдет более сильное дробление вещества и размеры кристаллитов будут иметь порядок десятков  $\text{ \AA}$ , т. е. содержать  $10^2 - 10^3$  атомов, то после разгрузки кристалл может перейти в разупорядоченное, стеклообразное состояние (см. [5]).

Экспериментальные данные по исследованию плотности дислокаций в неорганических кристаллах, подвергнутых ударному сжатию, приведены в таблице.

Интересная особенность дислокационной структуры ударно-обжатых кристаллов — наследование ими свойств исходного материала. Так, LiF, NaCl и CsI после ударного сжатия сохраняют старую дислокационную структуру, на фоне которой отмечаются новые дислокации. В случае же KBr после динамического сжатия наблюдается только новая дислокационная структура, что может быть связано с наличием фазового перехода у KBr в указанных условиях, который и приводит к размытию первоначальной дислокационной структуры (см. [11]).

Физическая причина увеличения плотности дислокаций при ударном сжатии кристаллов — разориентировка их блоков [6, 7, 9 — 12], след-