

Использование в арсенале современной физики сильных ударных волн сделало объектом лабораторного изучения давления в сотни тысяч и миллионы атмосфер. Этим способом в последние два десятилетия был значительно сокращен разрыв, отделявший область эксперимента от высокотемпературных и высокоплотных состояний, доступных для количественных теоретических расчетов. Методика ударных волн позволяет за короткие промежутки времени сжимать и нагревать изучаемые образцы, с высокой точностью находить кривые сжатия, фиксировать фазовые превращения первого и второго рода, определять кривые плавления, регистрировать электрические, оптические и магнитные явления в экстремальных состояниях вещества. Экспериментальные аспекты динамических методов определения сжимаемости заключаются в разгоне до высоких скоростей металлических ударников и прецизионном измерении их скоростей и волновых скоростей в образцах-мишенях. В литературе описано несколько методов плавного разгона ударников: а) продуктами взрыва цилиндрических зарядов до скоростей 0,5—5,5 км/сек, б) разгон ударников кумулятивными зарядами до скоростей 8 км/сек (Скидмор, 1962 г.), разгон с помощью гелиевых пушек (Джонс, США, 1966 г.). В Советском Союзе исследователями, работавшими в области сверхвысоких

давлений, уже в конце 40-х и в начале 50-х годов для получения давлений в миллионы атмосфер были созданы метателные системы со скоростями ударников 8—15 км/сек. Продвижение в область мегабарных давлений, как это показывает сравнение сроков публикаций, было осуществлено у нас намного раньше, чем в Англии и в США. Советскому Союзу принадлежит также приоритет в широком изучении металлов различной электронной структуры (Крушиков, Баканова), оптическом изучении свойств ударно-сжатых диэлектриков (Корнер, Синицын, Юшко), исследовании минералов (Трунин). Гандельманом, Дмитриевым и Подвальным впервые был осуществлен квантовомеханический расчет энергетических спектров сжатых металлов.

Оптическими исследованиями установлено, что в диэлектриках ширина фронта ударной волны не превышает $(2-3) \cdot 10^3 \text{ \AA}$. При скорости ударной волны $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ это означает, что радикальное изменение свойств вещества происходит в течение $\sim 10^{-11} \text{ сек}$. За эти короткие времена осуществляется сжатие, нагрев среды и, в ряде случаев, ее плавление или изменение электронной структуры. Кристаллографические аспекты деформации атомной решетки во фронте ударной волны еще полностью не выяснены. Ее одномерное сжатие является неустойчивым. Переход к трехмерной деформации и квазигидростатическому напряженному состоянию осуществляется в результате дислокационных сдвигов и перемещений на атомном уровне. В результате воздействия ударной волны возникают дефекты, появляются промежуточные донорные уровни и сетка дислокаций большой плотности. Перемещение фронта в диэлектриках вызывает их поляризацию.

Сдвиговые напряжения, возникающие на фронте ударной волны, являются мощным катализатором фазовых превращений. Примером превращений, протекающих за $10^{-6} - 10^{-8} \text{ сек}$, являются: образование ϵ -фазы Fe при 130 кбар, переход графита в BN в структуру алмаза, изменение координации у KCl и KBr, образование в ударной волне сверхплотной модификации кварца, возникновение новых фаз у минералов. Эти фазы представляют в первом приближении плотные анионные упаковки крупных кислородных ионов, в пустотах которых расположены небольшие катионы Si, Al, Mg и других металлов. При давлениях $\sim 1 \text{ мбар}$ имеет место примерное равенство эквивалентных кислородных объектов у различных минералов и окислов.

Полученные в Советском Союзе данные по сжимаемости минералов и металлов позволили сравнить плотности мантии и ядра Земли на различных глубинах с их кривыми сжатия. Было установлено, что состояниям мантии удовлетворяют $p - \rho$ -зависимости ультраосновных горных пород, если они содержат 12—18% окислов железа. В свою очередь ядро Земли имеет плотность кремнистого железа, с 10—15%-ным содержанием кремния. Результаты динамических экспериментов не подтвердили гипотезы об образовании земного ядра из сверхплотных металлических фаз минералов. Вопросы генезиса земного ядра и распределения железа в Солнечной системе остаются пока не решенными.

Как показали эксперименты по ударному сжатию свыше 50 металлов, осуществленные главным образом в Советском Союзе, приложение ударных мегабарных давлений приводит к сильному выглаживанию кривых атомных объемов. Это обстоятельство свидетельствует о большей сжимаемости элементов, имеющих при нормальных условиях большие атомные объемы. На эту общую закономерность накладываются очень существенные особенности, связанные с перестройкой при сжатии электронной структуры атомов. Электронные перестройки приводят к прерывному возрастанию упругости металлов и к появлению вследствие этого на адиабатах металлов резких изломов. Электронные превращения, ранее известные только у Ce и Cs, обнаружены методом ударных волн почти у всех элементов больших периодов, относящихся к первым пяти А-группам, т. е. у щелочных, щелочноземельных, редкоземельных и переходных металлов, занимающих на кривой атомных объемов ее верхние положения и спадающие ветви. Атомы всех этих элементов при нормальных условиях имеют незаполненные или мало заполненные внутренние d -оболочки. Переселение внешних s -электронов на d -уровни вызывает образование более плотных и мало сжимаемых электронных конфигураций с увеличенным числом связывающих d -электронов. Правильность предложенной интерпретации подтверждают квантовомеханические расчеты, выполненные в сферическом приближении Вигнера — Зейтца по методу Гандельмана — Дмитриева.

При наиболее высоких давлениях ударного сжатия и особенно при сжатии пористых тел существенная роль принадлежит тепловым составляющим энергии и давления. Следует различать три температурных диапазона: 1. Температуры гармонического приближения. Тепловой вклад в уравнение состояния определяется здесь фононами. 2. Температуры, вызывающие переход атомов и ионов из эффективно жидкого в эффективно газообразное состояние. Этот переход, связанный с уменьшением тепловой упругости атомов, экспериментально проявляется в изгибе ударных адиабат пористых образцов. 3. Температуры возбуждения электронов и образования высокоплотной горячей плазмы. Степень экспериментального и теоретического освоения высокотемпературной области демонстрируют результаты исследования ударных адиабат. Нижние участки адиабат, до 10 мбар и температур $\sim 60\,000^\circ \text{ K}$, для многих металлов зарегистрированы экспериментально. Их термодинамические характеристики

вычислены также квантовомеханическими методами. Область выше 100 мбар рассчитывается по квантостатистическим теориям, а промежуточные интервалы уверенно интерполируются. Особый интерес для физики твердого и жидкого состояния представляет регистрация кривых плавления, осуществленная оптическими методами у ряда прозрачных диэлектриков при давлениях 0,5—1 мбар и температурах 3—5 тысяч градусов.

Ближайшие цели физики высоких и сверхвысоких давлений состоят в распространении исследований на новые классы органических и неорганических соединений, в выяснении основных кристаллохимических закономерностей образования плотных фаз высокого давления. Особого внимания со стороны как экспериментаторов, так и теоретиков заслуживает проблема перехода диэлектриков в металлическое состояние. Большое научное и практическое значение будет иметь изучение механизмов фазовых превращений и химических реакций в сильных ударных волнах и исследование сопутствующих ударному сжатию электрических, оптических и магнитных явлений. Следует ожидать получения интересных результатов при изучении расширения тел, сжатых сильными ударными волнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, Физика ударных волн, М., Физматгиз, 1963.
2. Л. В. Альтшулер, УФН 85 (2), 197 (1965).
3. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, УФН 96 (2), 193 (1968).
4. С. Б. Кормер, УФН 94 (4), 641 (1968).
5. Л. В. Альтшулер, Б. Н. Моисеев, Р. Ф. Трунин, Л. В. Попов, Г. С. Сямаков, ЖЭТФ 54 (3), 785 (1966).
6. Comportement des milieux denses sous hautes pressions dynamiques, Paris—New York, 1968.
7. А. А. Баканова, И. П. Дудолодов и Ю. Н. Сутулов, ФТТ 11 (7), 1881 (1969).