

45. Basiev T T et al., in *Proc. Laser 98 Conference, Tucson, Dec. 1998* (Eds V J Corcoran, T A Goldman) (McLean, VA: STS PRESS, 1999) p. 712
46. Basiev T T et al., in *Tech. Digest. Novel Lasers and Devices — Basic Aspects* (CLEO-EUROPE Focus Meeting 99, Munich, 1999) p. 160

PACS numbers: 42.62.-b, 61.80.Ba

Применение лазерных ударных волн для изучения теплофизических и механических свойств вещества

И.К. Красюк

Лазеры дают уникальную возможность для изучения физических свойств вещества при высоких концентрациях энергии [1]. Исследования по лазерному термоядерному синтезу показывают, например, что, воздействуя импульсным лазерным излучением на оболочечные сферические мишени, в их центре можно получить как значительное сжатие вещества мишени (1000 г см^{-3}), так и его нагрев до высоких температур (100 кэВ).

В типичных условиях при действии импульса лазерного излучения на поверхности мишени образуется высокотемпературная плазма. Гидродинамический разлет плазмы приводит к действию на мишень абляционного давления, вызванного импульсом отдачи. В результате в мишени формируется ударная волна, амплитуда которой может достигать сотен мегабар. За фронтом ударной волны происходит нагрев и сжатие вещества мишени.

Разработанные к настоящему времени экспериментальные методы позволяют использовать лазерные ударные волны для изучения термодинамических и механических характеристик вещества в экстремальных условиях. Одно из важных применений лазерных ударных волн — это создание широкодиапазонных полумпирических уравнений состояния вещества. При этом появляется возможность проникнуть в ранее неизученные области фазовых диаграмм.

Метод исследования основан на использовании алгебраических соотношений между гидродинамическими величинами на поверхности разрыва, являющихся следствием общих законов сохранения массы, импульса и давления [2]:

$$\begin{aligned} P &= P_0 + U \frac{D}{V_0}, \\ V &= (D - U) \frac{V_0}{D}, \\ E &= E_0 + 0,5(P_0 + P)(V_0 - V). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь V — удельный объем, P — давление, E — внутренняя энергия, D — скорость фронта ударной волны по невозмущенному веществу, U — массовая скорость, т.е. скорость частиц за фронтом ударной волны, индекс "0" относится к величинам, характеризующим невозмущенное вещество перед фронтом ударной волны.

Регистрируя любые два из пяти параметров P , V , D , U , E , с помощью соотношений (1) можно найти гидродинамические и термодинамические характеристики вещества и установить связь между ними с помощью калориче-

ского уравнения состояния

$$E = E(P, V). \quad (2)$$

В случае металлов обычно измеряют кинематические параметры D и U . Измерения сводятся к регистрации времен, за которые фронт ударной волны проходит фиксированные (базисные) расстояния. Точность измерения фазовой D и групповой U скоростей движения ударной волны в практически важных случаях должна быть не хуже 5–10 %.

Использование динамических методов диагностики, основанных на соотношениях (1), для получения ударных адиабат предполагает стационарность и одномерность гидродинамических течений исследуемого вещества. Стационарность и одномерность обеспечиваются выбором толщины мишени и диаметра пятна облучения. Начальное состояние мишени также имеет существенное значение, поскольку лазерная генерация ударных волн связана с образованием на лицевой поверхности мишени высокотемпературной плазмы, вследствие чего возможен предпрогрев вещества мишени рентгеновским излучением плазменной короны и потоком быстрых электронов.

Наличие уравнения состояния в калорическом виде (2) позволяет проводить гидродинамические расчеты адиабатических течений вещества. Однако учет процессов с теплопереносом или излучением требует явного задания температуры как функции давления и объема:

$$T = T(P, V). \quad (3)$$

В случае металлов прямое измерение температуры вещества за фронтом ударной волны оптическими методами представляет собой весьма сложную задачу, главным образом из-за наличия экранировки излучения из горячих областей мишени парами вещества в волне разгрузки. Отметим, что вследствие экспериментальных трудностей и неоднозначности интерпретации получаемых данных лишь небольшое число имеющихся работ по лазерной генерации ударных волн посвящено прямому измерению температуры вещества за фронтом ударной волны в металлах.

Из-за короткой длительности воздействия экспериментальное изучение термодинамических свойств вещества с помощью лазерных ударных волн достаточно затруднительно. Возникает необходимость удовлетворить ряд требований на конструкцию и точность изготовления мишени, качество и мощность лазерного пучка, пространственное и временное разрешение регистрирующей аппаратуры.

При типичной длительности лазерного воздействия около 1 нс толщина мишени не должна превышать 15–20 мкм, а диаметр пятна облучения должен быть не менее 150–200 мкм. Возникающие экспериментальные трудности могут быть преодолены применением измерительной аппаратуры с высоким временным и пространственным разрешением и выполнением особых требований к точности и чистоте изготовления мишеней из исследуемого материала.

Другое направление, связанное с применением лазерных ударных волн, — это исследование механических свойств вещества при сверхвысоких скоростях деформирования. При отражении ударной волны от тыльной поверхности мишени вблизи нее возникает область растягивающих напряжений ("отрицательных" давле-

ний). В результате на тыльной стороне мишени развиваются откольные явления, приводящие к отрыву части мишени.

Использование лазерных ударных волн позволяет изучать откольные явления при скоростях деформирования, почти на два порядка превышающих ранее достигнутые. При этом вполне реальным оказывается достижение теоретического предела прочности исследуемого материала. При исследовании откольных явлений одно из основных требований состоит в обеспечении одномерности протекающих процессов.

Эксперименты по лазерной генерации ударных волн проводились на мощных лазерных установках на стекле с неодимом Центра коллективного пользования Института общей физики РАН, действующего при финансовой поддержке РФФИ. Использовались как основное излучение с длиной волны 1,06 мкм, так и его вторая гармоника. Имелась возможность выполнять эксперименты при длительности лазерного воздействия от 2,5 до 80 нс с регулируемой формой импульса.

Интенсивность лазерного излучения на мишени достигала 4×10^{14} Вт см⁻², а соответствующее этой интенсивности абляционное давление — 50 Мбар. Измерительный комплекс включал в себя быстродействующую электронную и оптическую измерительную аппаратуру. Впервые для диагностики мощных ударных волн применялись волоконные световоды и оптические элементы на их основе. При исследовании откольных явлений использовался специально созданный лазерный интерференционный измеритель скорости.

Для моделирования изучаемых явлений был создан пакет численных программ на основе уравнений гидродинамики с использованием термодинамически полных широкодиапазонных полумпирических реальных уравнений состояния исследуемых веществ. При вычислении коэффициентов поглощения света в волне разгрузки использовался численный код, основанный на применении обобщенной "химической" модели, учитывающей эффекты неидеальности, вырождения и перехода металл — диэлектрик. В качестве более простого способа вычисления коэффициентов поглощения использовалась также формула Крамерса — Унзольда, применимая в случае газа из водородоподобных атомов.

Более подробное описание экспериментальных и численных методов исследования явлений, связанных с лазерными ударными волнами, можно найти в [3].

К одному из последних достижений при исследовании теплофизических свойств вещества относится измерение температуры вещества за фронтом ударной волны алюминиевой мишени и изучение ее предпрогрева [4]. Работа проводилась в рамках международного научного сотрудничества. Эксперименты выполнялись на лазерной установке в LULI (Ecole Polytechnique, Palaiseau, France).

Лазерное излучение с длиной волны излучения 0,53 мкм имело длительность 0,6 нс. Интенсивность лазерного излучения на мишени достигала 3×10^{13} Вт см⁻². В опытах использовались ступенчатые мишени из алюминия с толщиной базы 9,4 мкм и высотой ступени 4 мкм при ширине переходной зоны около 2 мкм. Давление за фронтом ударной волны определялось известной ударной адиабатой алюминия по результатам измерения времени прохода ударной волной базисного расстояния — ступени на мишени. Для измерения "цветовой" температуры вещества в волне разгрузки

использовался двухканальный пирометр с временным разрешением ± 5 пс.

Результаты одного из опытов приведены на рис. 1. Измеренное за фронтом ударной волны давление равнялось 6,8 Мбар. Толстой сплошной линией показано изменение во времени измеренной "цветовой" температуры вещества в волне разгрузки, тонкой сплошной линией — расчетные максимальные значения истинной температуры вещества в волне разгрузки. Видно, что в пределах экспериментальной погрешности измеренные и расчетные значения температуры совпадают.

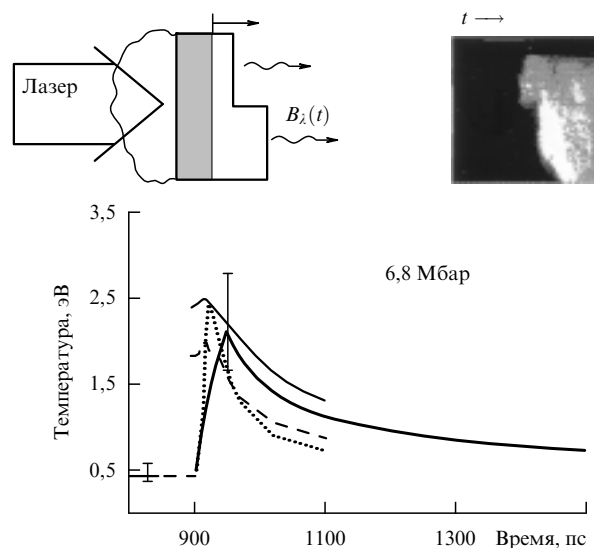


Рис. 1. Теплофизические свойства ударно-сжатого алюминия.

Пунктирной и штриховой линиями на рис. 1 показаны "цветовые" температуры излучения с тыльной поверхности мишени, вычисленные с помощью специального численного кода и формулы Крамерса — Унзольда соответственно. Установлено, что затягивание переднего фронта на экспериментальной кривой указывает на предпрогрев вещества мишени перед фронтом ударной волны. В верхней части рис. 1 приведены схема эксперимента по лазерной генерации ударных волн и одна из фотохронограмм свечения, возникающего при выходе фронта ударной волны на свободную поверхность ступенчатой мишени.

К одному из интересных результатов изучения откольных явлений относятся измерения откольной прочности алюминиевого сплава АМг6М в зависимости от скорости деформирования [5]. Оказалось, что при приближении скорости деформирования к 10^8 с⁻¹ механическая прочность приближается к теоретическому пределу. На рисунке 2 представлена совокупность экспериментальных данных, включающих в себя результаты как взрывных, так и лазерных экспериментов. В левом верхнем углу рисунка приведено фото тыльной стороны мишени после лазерного воздействия. Хорошо виден почти отделившийся от мишени откольный слой вещества.

Результаты совместных исследований, выполненных сотрудниками Института общей физики РАН, Научно-исследовательского центра теплофизики импульсных воздействий ОИВТ РАН, Института проблем химиче-

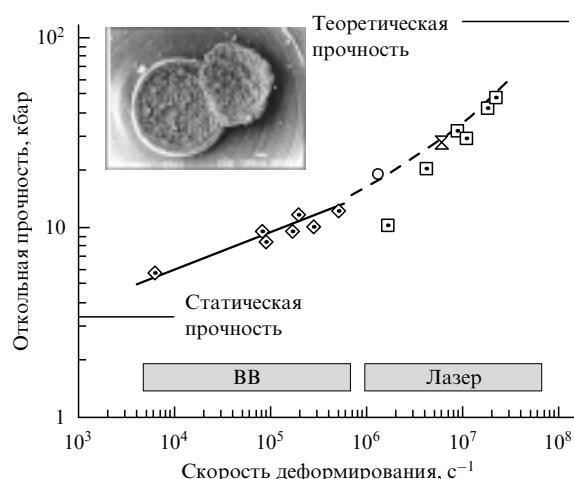


Рис. 2. Откольная прочность алюминиевого сплава АМг6М.

ской физики РАН, University of Milan, Dipartimento di Fisica (Milano, Italy) и LULI (Ecole Polytechnique, Palaiseau, France), показывают перспективность использования лазеров для генерации ударных волн с целью изучения теплофизических и механических свойств вещества в экстремальных условиях. Экспериментальные трудности, имеющиеся в настоящее время, могут быть преодолены в ближайшем будущем.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 94-02-03413, 97-02-16456) и ИНТАС – РФФИ (проект N 95-0631).

Список литературы

1. Анисимов С И, Прохоров А М, Фортон В Е *УФН* **142** 395 (1984)
2. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966)
3. Вовченко В И, Красюк И К, Семенов А Ю, в кн. *Физические процессы в оболочечных конических мишенях* (Труды ИОФАН, Т. 36) (М.: Наука, 1992) с. 129
4. Batani D et al. *Control Fusion* **41** 93 (1999)
5. Vovchenko V I et al., in *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* (Eds S Nakai, G H Miley) Vol. 1 (New York: AIP Press, 1995) p. 369

PACS numbers: 62.50. + p, 62.20.Dc, 64.70.Kb, 64.70.Pf

Превращения в аморфных твердых телах при высоких давлениях

А.Г. Ляпин, В.В. Бражкин, Е.Л. Громницкая, О.В. Стальгорова, О.Б. Циок

Фазовый полиморфизм при высоком давлении хорошо изучен для многих кристаллических твердых тел [1]. В кристаллах с ростом давления происходят фазовые переходы (как правило, 1-го рода), к более плотным атомным упаковкам в соответствии с принципом Ле-Шателье. В последнее время появились указания на то, что во многих расплавах также возможны фазовые переходы 1-го рода, хотя для большинства веществ такие превращения, по-видимому, могут реализоваться только в области переохлажденной жидкости, значительно ниже температуры плавления [2, 3].

В целом ряде работ, чаще всего на примере воды, проводятся параллели между фазовыми переходами в переохлажденной жидкости и превращениями в соответствующих аморфных твердых фазах [4–6]. Однако подобные аналогии не совсем оправданы, поскольку аморфные вещества являются неэргодическими системами и вообще не имеют области термодинамической стабильности на фазовой диаграмме, а само понятие "фаза" может быть использовано в применении к аморфным модификациям с большой долей условности. Аморфные вещества существуют в метастабильном состоянии лишь при достаточно низких температурах, где заморозена диффузия. В то же время даже при низких температурах в аморфных фазах могут протекать релаксационные процессы [7].

Тем не менее в аморфных и стеклообразных веществах существует вполне определенный ближний порядок [7]. Возникает естественный вопрос: возможны ли в аморфной фазе при сжатии скачкообразные изменения объема, структуры ближнего порядка и других свойств? Хорошо известно, что ряд тетраэдрических аморфных полупроводников и халькогенидных стекол кристаллизуется под давлением (см. [8] и цитированную там литературу).

Вместе с тем для оксидных стекол SiO_2 и GeO_2 и аморфного льда H_2O различными экспериментальными методами надежно установлено существование обратимых превращений между аморфными модификациями с изменением структуры ближнего порядка и плотности [9–17] (в дальнейшем называемых также структурными или координационными переходами). Кроме того, существуют экспериментальные свидетельства структурных превращений под давлением и в других аморфных веществах, например в аморфных модификациях углерода [18, 19].

Наиболее интригующим является выяснение механизма подобных превращений. В кристаллах фазовые переходы происходят посредством зарождения и диффузионного роста новой фазы (диффузионные превращения) или как когерентное смещение атомов решетки (мартенситные превращения). В случае превращений между аморфными фазами обе эти возможности не могут быть реализованы, в связи с чем вопрос не только о механизме, но и о самой возможности резких структурных превращений в аморфных материалах при сжатии до последнего времени оставался открытым.

Ниже представлены результаты прецизионных исследований плотности оксидных стекол SiO_2 и GeO_2 под давлением. Превращение между аморфными модификациями низкой и высокой плотности льда H_2O ($l_{\text{da}} \leftrightarrow h_{\text{da}}$) исследовалось ультразвуковым методом. Особое внимание уделено изучению кинетики превращений и динамики аморфных сеток вблизи переходов. Рассмотрены концептуальные подходы к описанию превращений между аморфными фазами.

Плотность $\alpha\text{-SiO}_2$ и $\alpha\text{-GeO}_2$ измерялась тензометрическим методом в гидростатических условиях до 9 ГПа [20]. Одно из главных достоинств данной методики — это высокая точность измерения как абсолютных (около 0,3 %), так и относительных (порядка 10^{-3} %) изменений объема, причем последнее особенно важно при исследовании релаксационных процессов. Некоторые результаты измерений представлены на рис. 1, 2. С экспериментальной точки зрения наиболее удобным объектом