

УДК 533.06.011

## ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ УДАРНО-СЖАТОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ СО СТЕКЛЯННЫМИ МИКРОСФЕРАМИ

С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, bordz@ngs.ru

Проведена оценка температуры горячих точек при ударном сжатии смеси эпоксидной смолы со стеклянными полыми микросферами. Полученное значение температуры горячих точек 3200 К при давлении в ударной волне 20 ГПа значительно превышает температуру однородной ударно-нагруженной эпоксидной смолы, которая при этом давлении находится в диапазоне 1100 ÷ 1400 К. Оптическим быстродействующим пирометром определены временные характеристики излучения, генерируемого при вязкопластическом сжатии монослоя полых микросфер в эпоксидной матрице при давлении 9, 20 и 29 ГПа. Сопоставление экспериментальных данных с результатами оценок на основе вязкопластической модели деформирования показало их хорошее соответствие.

Ключевые слова: оптическое излучение, ударное сжатие, микросфера, монослой, вязкопластическое деформирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Вещества, исследуемые при динамическом нагружении, часто являются гетерогенными из-за наличия в них микронеоднородностей. Форма этих неоднородностей и природа их возникновения весьма разнообразны. При ударно-волновом нагружении гетерогенных веществ, твердых или жидких, микронеоднородности, находящиеся внутри них, играют большую роль. В результате взаимодействия ударной волны (УВ) с такими включениями образуются локальные очаги с повышенной концентрацией энергии, так называемые горячие точки [1]. Особенно заметно влияние неоднородностей проявляется в процессе инициирования гетерогенных взрывчатых веществ (ВВ): критические параметры инициирования сильно снижаются. Обзор основных механизмов возникновения горячих точек проведен в [2]. Одним из типов неоднородностей являются поры внутри исследуемого вещества. Теоретическому анализу поведения пор при воздействии УВ посвящен ряд работ [3, 4]. Проводились также экспериментальные исследования влияния пористости

гетерогенного ВВ на температуру, регистрируемую оптическим методом (см., например, [5]). Известно применение стеклянных микросфер в водоэмульсионных ВВ в качестве центров инициирования реакции. Теоретический анализ сенсibiliзирующего действия стеклянных микросфер на возбуждение химической реакции в жидком ВВ выполнен в [6].

В данной работе проводится физическое моделирование пористости твердого вещества путем введения стеклянных пустотелых микросфер в твердую матрицу из эпоксидной смолы. Цель работы — измерение временных и амплитудных характеристик спектральной светимости ударно-сжатых образцов. Представляет интерес сравнение этих данных с результатами определения яркостной температуры эпоксидной смолы в диапазоне ударного давления 20 ÷ 40 ГПа [7], а также анализ результатов с точки зрения вязкопластической модели деформирования пор под действием УВ [4].

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема опытов показана на рис. 1. Ударник из сплава Д16Т толщиной 5 ÷ 10 мм генерировал ударную волну в алюминиевой пластине — экране толщиной 5 мм. Далее УВ проходила в образец из эпоксидной смолы марки ЕС 141NF, в которую добавляли микросферы марки МС-В. Тепловое излучение из ударно-сжатой зоны образца падало на торцы пучка световодов, расположенных на расстоянии

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-08-00092-а), программы Президиума РАН № 2.9 и частично фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-247.2012.1).

© Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В., 2014.

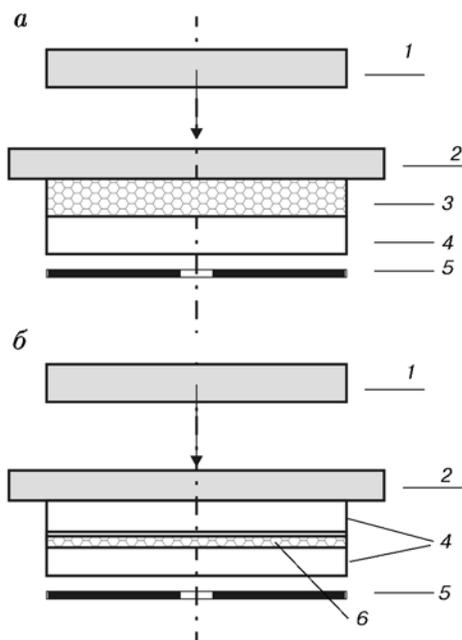


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — ударник, 2 — экран, 5 — апертюра; а — сплошной гетерогенный образец: 3 — эпоксидная смола с микроферами, 4 — эпоксидная смола, б — образец с монослоем микрофер: 4 — эпоксидная смола, б — монослой микрофер

50 мм от свободной поверхности образца, и по световодам передавалось из взрывной камеры к четырехканальному быстродействующему оптическому пирометру, использующему фотоумножители (ФЭУ) в качестве детекторов излучения [8]. В измерительных каналах устанавливали интерференционные светофильтры на длине волны  $\lambda = 550$  и  $630$  нм с шириной полосы пропускания 10 и 20 нм соответственно. В ряде экспериментов для улучшения отношения сигнал/шум использовали комбинированный светофильтр КС-СЗС из цветного стекла ( $\lambda = 660$  нм,  $\Delta\lambda = 120$  нм) и светофильтр из стекла ОС-12 с нижней границей пропускания 560 нм. Временное разрешение измерительного тракта в различных опытах менялось от 10 до 50 нс. В экспериментах регистрировали яркостную температуру и временные характеристики оптического излучения. Оптический тракт с фотоумножителями перед каждым опытом калибровали при помощи образцовой температурной лампы ТРУ 1100-2350 в рабочем диапазоне температур лампы (до 2350 К). Предполагается, что спектр излучения эталонной лампы соответствует излучению абсолютно черного тела. Результаты ка-

либровки описывались линейной зависимостью в координатах  $(\ln U, 1/T)$ , где  $U$  — амплитуда сигнала ФЭУ,  $T$  — абсолютная температура. Эту зависимость экстраполировали в область температур до 3500 К. Регистрацию свечения эталонной лампы при калибровке и образца в эксперименте проводили при одинаковых геометрии опыта, апертюрах, светофильтрах и напряжении питания ФЭУ. Это позволяло определять яркостную температуру при известной площади источника излучения в опыте.

Для использованных микрофер максимум функции распределения по размерам находился в диапазоне  $50 \div 60$  мкм [9]. Толщина стенки микроферы составляла  $\approx 1$  мкм. Опыты выполняли в двух вариантах. В первом использовался сплошной гетерогенный образец толщиной  $3 \div 5$  мм (рис. 1, а). Для его изготовления в эпоксидную смолу плотностью  $\rho_0 = 1.13$  г/см<sup>3</sup> добавляли микроферы (массовая доля  $\approx 2\%$ ). Плотность такого компаунда  $\rho_{00} = 1.054$  г/см<sup>3</sup>, расчетная пористость  $k = (\rho_0 - \rho_{00})/\rho_0 = 0.068$ . Нижняя часть образца была закрыта слоем однородного эпоксидного компаунда толщиной 5 мм, который служил оптическим окном. В соответствии с техническими условиями время полимеризации каждого слоя составляло 48 ч, что обеспечивало минимальное содержание воздушных пузырьков в образце.

Во второй постановке (рис. 1, б) внутри однородного эпоксидного компаунда создавали монослой микрофер, нанося их на липкую ленту (скотч толщиной 40 мкм). Монослой вместе с подложкой заливали жидкой эпоксидной смолой, и смолу полимеризовали. Степень заполне-

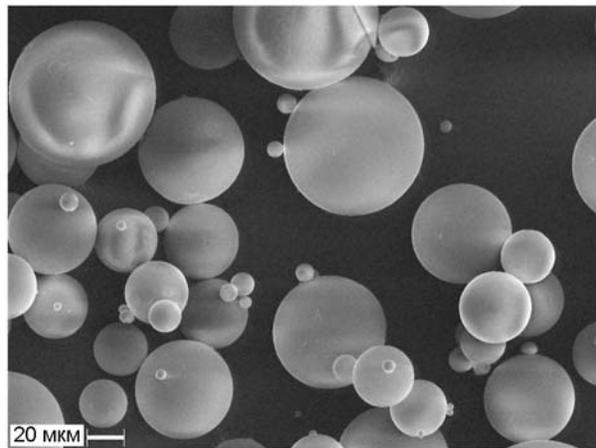


Рис. 2. Фотография монослоя микрофер

ния поверхности подложки микросферами (относительная площадь проекций микросфер на плоскость подложки) контролировали при помощи электронного сканирующего микроскопа. В среднем она составляла  $\approx 0.5$ . Типичная микрофотография показана на рис. 2.

Для оценки давления в сплошных гетерогенных образцах измеряли скорость УВ в них и затем рассчитывали давление с учетом пористости образца.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для построения  $x-t$ -диаграммы движения УВ необходимо определить моменты ее входа в образец и выхода из него. Использование какого-либо датчика на разделе экран — образец для определения момента входа УВ в образец ( $t_0$ ) оказалось нежелательным, поскольку приводило к паразитному излучению, вызванному наличием дополнительных излучающих границ. Поэтому для регистрации этого момента чувствительность одного из каналов устанавливали максимальной, и появление сигнала в этом канале принимали за момент входа УВ в образец. Такой способ использован нами в [10] и показал достаточную надежность. В качестве примера на рис. 3, в показан зарегистрированный на этом канале сигнал (кривая 1). Минимальная регистрируемая амплитуда (4 мВ) соответствовала температуре 1600 К. Такое значение практически совпадало с температурой образца из эпоксидной смолы при ударном давлении 34 ГПа. Для определения момента выхода УВ из образца ( $t_4$ ) в экспериментальной сборке на тыльной поверхности образца устанавливали контактный датчик. Его сигнал точно совпадал с импульсом излучения, которое возникало при выходе УВ в воздух.

На рис. 3, а показан профиль светимости в случае образца с монослоем микросфер. Интервал  $t_4 - t_0$  определяет среднюю скорость УВ в образце. Момент выхода УВ на границу монослой микросфер — смола ( $t_2$ ) рассчитан по скорости УВ  $u_s = 7.54$  км/с, измеренной в однородном образце эпоксидной смолы (оценка давления по ударной адиабате эпоксидной смолы [11]  $p = 29$  ГПа). Как видно из рисунка, максимум яркости свечения микросфер  $t_3$  отстает от момента выхода УВ на границу раздела монослой — однородная смола на время  $\tau_1 \approx t_3 - t_2 \approx 0.2$  мкс. Поэтому данный временной интервал следует отнести к фазе сжатия

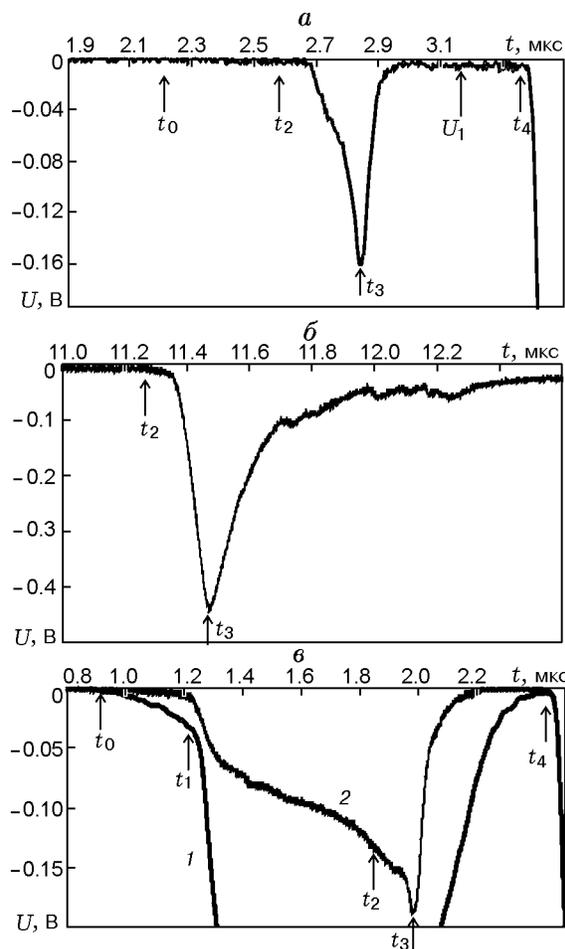


Рис. 3. Профили спектральной светимости:

а, б — образцы с монослоем ( $\lambda = 550$  и  $630$  нм), давление 29 и 9 ГПа соответственно, в — сплошной гетерогенный образец ( $\lambda = 630$  нм), давление 20 ГПа; а:  $t_0$  — вход УВ в сплошной образец смолы,  $t_2$  — выход УВ на границу монослой микросфер,  $t_3$  — максимум яркости,  $t_4$  — выход УВ на границу смола — воздух,  $U_1$  — амплитуда сигнала, по которой определялась остаточная температура эпоксидной смолы; б:  $t_2$  — выход УВ на границу монослой микросфер,  $t_3$  — максимум яркости; в:  $t_0$  — вход УВ в гетерогенный образец,  $t_1$  — точка резкого увеличения скорости нарастания светимости,  $t_2$  — расчетный момент выхода УВ на границу гетерогенный образец — смола,  $t_3$  — максимум яркости,  $t_4$  — выход УВ на границу смола — воздух; 1, 2 — импульсы светимости при разной чувствительности каналов

микросфер за фронтом УВ. Характерное время спада сигнала до уровня 0.1 от максимальной амплитуды составило  $\tau_2 \approx 0.08$  мкс.

На рис. 3, б представлен профиль светимости, полученный в эксперименте с монослоем при давлении 9 ГПа, скорость УВ в однород-

ной смоле 4.87 км/с. При этом по уравнению состояния [7] температура смолы составляет  $\approx 650$  К, что находится за пределами чувствительности регистрирующей схемы. Время нарастания сигнала от момента начала сжатия монослоя до достижения максимальной амплитуды  $t_3 - t_2 \approx 0.17$  мкс совпадает со значением  $\tau_1$ , измеренным в предыдущем опыте. Следует обратить внимание на то, что спад сигнала происходит гораздо медленнее, чем на рис. 3,а, и составляет  $\tau_2 \approx 0.7$  мкс.

На рис. 3,б показана зависимость светимости сплошного гетерогенного образца от времени при его нагружении ударной волной. Обозначения характерных моментов времени те же, что на рис. 3,а, за исключением момента  $t_1$ , отмечающего точку резкого увеличения скорости нарастания светимости, и  $t_2$  — расчетного момента выхода УВ на границу гетерогенный образец — смола. Здесь интервал  $t_4 - t_0$  также определяет среднюю скорость УВ в образце  $u_s = 6.33$  км/с (при этой скорости оценка давления по ударной адиабате пористой смолы дает значение 20 ГПа).

На регистрируемых импульсах светимости (см. рис. 3,б, кривые 1, 2) можно выделить интервал  $t_1 - t_0$ , характеризующий вязкопластический разогрев при сжатии в образце первых слоев микросфер. Интервал  $t_2 - t_1$  связан с увеличением толщины излучающего слоя и экспоненциальным ростом сигнала по мере приближения ударного фронта к границе образца.

Согласно расчету в момент времени  $t_2$  УВ выходит на границу смолы с микросферами и однородной смолы, но амплитуда сигнала продолжает расти вплоть до  $t_3$ , поэтому увеличение яркости в промежутке  $t_3 - t_2$ , по-видимому, соответствует сжатию последних слоев микросфер, примыкающих к границе раздела. Для определения момента выхода УВ на границу гетерогенный образец — однородная смола ( $t_2$ ) можно воспользоваться измеренной средней скоростью УВ в образце ( $u_s = 6.33$  мм/мкс), что для интервала  $t_3 - t_2 = 0.22$  мкс дает оценку сверху. Для оценки этого интервала снизу воспользуемся значением скорости УВ в однородном эпоксидном образце  $u_s = 7.54$  мм/мкс. В этом случае  $t_3 - t_2 = 0.11$  мкс. Отсюда следует, что «запаздывание» в достижении максимума светимости относительно выхода УВ на поверхность раздела гетерогенный образец — однородная смола лежит

в интервале времени  $t_3 - t_2 = 0.11 \div 0.22$  мкс. Отметим, что время спада сигнала на рис. 3,б  $\approx 0.12$  мкс несколько больше, и это связано с тем, что в этом опыте временное разрешение системы было хуже, чем в опыте на рис. 3,а.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схема сжатия микросфер за фронтом УВ показана на рис. 4. Сначала рассмотрим случай со сжатием образца с монослоем микросфер. После входа УВ в образец в момент  $t_0$  (см. рис. 3,а) сигнал отсутствует, так как температура ударно-сжатой матрицы находится ниже порога чувствительности системы регистрации. После прохождения ударной волной монослоя ( $t_2$  на рис. 3,а) микросферы начинают схлопываться, что сопровождается их вязким разогревом. При схлопывании микросферы (см. рис. 4, позиция 1) образуется зона нагретого вещества с радиальным распределением температуры от максимальной вблизи внутренней поверхности микросферы до температуры окружающей среды, в качестве которой можно принять температуру эпоксидной смолы за фронтом УВ. После того как тепловое излучение от микросфер достигает порога чувствительности системы, регистрируется поток излучения (см. рис. 4, позиция 2) и начинается рост сигнала светимости. Начало этого роста несколько запаздывает (в пределах  $\approx 10^{-7}$  с) относительно момента  $t_2$ .

В случае сплошного гетерогенного образца профиль светимости имеет совсем другую форму. Когда УВ входит в образец (точка  $t_0$  на рис. 3,б), она сжимает матрицу, температура которой находится на пороге чувствительности системы регистрации, и сигнал излучения

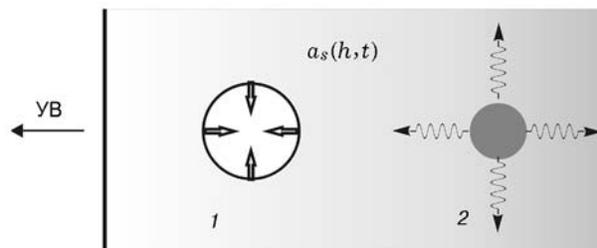


Рис. 4. Схема процесса сжатия (1) и высвечивания (2) микросферы:

$a_s(h, t)$  — коэффициент поглощения излучения ударно-сжатой смолой (более темная зона соответствует большему коэффициенту поглощения)

от ударно-сжатой смолы практически не регистрируется. Одновременно со сжатием матрицы за фронтом УВ сжимаются в вязком режиме и микросферы [6]. Поэтому начиная с момента  $t_1$  (см. рис. 3,б) сигнал быстро нарастает, а затем профиль светимости становится типичным для среды с сильным рассеиванием света [10].

В обоих случаях при дальнейшем движении УВ по эпоксидной смоле, не содержащей микросфер, между фронтом УВ и плоскостью, в которой излучение от микросфер достигает максимума, образуется нагретый слой ударно-сжатой смолы. Температура слоя соответствует разогреву однородной матрицы, а коэффициент поглощения  $a_s(h, t)$  зависит от времени  $t$  и расстояния от фронта УВ  $h$  (см. рис. 4). Этот слой начинает экранировать излучение горячих точек. Однако полная экранировка происходит с некоторой задержкой, зависящей в свою очередь от скорости увеличения коэффициента поглощения ударно-сжатой смолы. По результатам, полученным в однородной смоле [7], задержка составляет  $\approx 0.1 \div 0.2$  мкс при давлении в УВ  $\approx 30$  ГПа. В пользу этого свидетельствует сильное увеличение времени (до 0.7 мкс) спада импульса излучения при пониженном давлении (см. рис. 3,б). Оценки возможного времени спада сигнала за счет теплопроводности и излучения сделаны ниже.

Сопоставляя результаты экспериментов с гетерогенным образцом и с содержащим монослой микросфер, можно оценить средний диаметр микросфер в сжатом состоянии ( $\delta_1$ ) за фронтом УВ. Опыты с этими образцами проводили в идентичных условиях: один и тот же канал регистрации, одинаковые светофильтры ( $\lambda = 550$  нм), одинаковые напряжения питания и практически совпадающие калибровочные зависимости. Сигналы светимости приведены на рис. 5. Средняя толщина монослоя микросфер 60 мкм. Пиковые амплитуды сигналов от источников излучения составляли  $U_1 = 380$  мВ для гетерогенного образца и  $U_2 = 18$  мВ для образца с монослоем.

Будем считать, что амплитуда сигналов ФЭУ пропорциональна световому потоку ( $\Phi$ ), падающему на торец световода. Тогда  $\Phi_2/\Phi_1 = U_2/U_1 = 0.047$ . Световой поток излучения, испускаемого источником, пропорционален его площади. Это позволяет сравнивать световые потоки в опыте со сплошным образцом и в опыте с монослоем из микросфер. Как известно, при малых углах потоки излучения

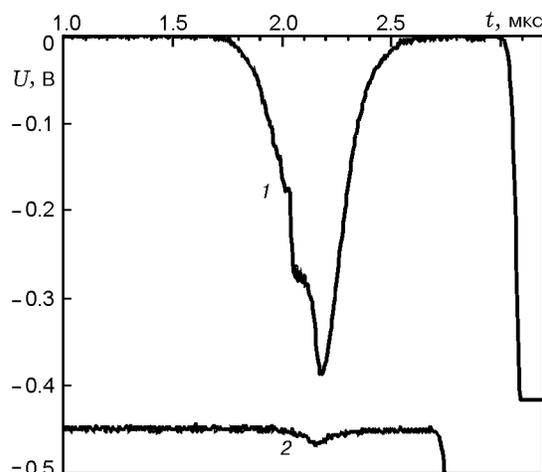


Рис. 5. Профили спектральной светимости ( $\lambda = 550$  нм) сплошного гетерогенного образца (1) и образца с монослоем микросфер (2), зарегистрированные при идентичных условиях

от сферического и плоского ламбертовского излучателя совпадают. Поэтому можно считать, что световой поток, падающий на торец световода, в обоих опытах пропорционален площади проекций источников излучения на плоскость, перпендикулярную направлению излучения. В опыте со сплошным образцом эта площадь ограничена апертурой, находящейся на торце образца. Поскольку проекции микросфер на плоскость перекрываются, для оценки можно полагать, что излучаемая поверхность однородна и имеет одинаковую светимость. В опыте с монослоем микросфер в качестве излучающей поверхности будем считать площадь проекций микросфер на плоскость апертуры. Если  $S_1$  и  $S_2$  — относительные площади проекций микросфер на плоскость, перпендикулярную направлению излучения в исходном и сжатом состояниях соответственно, то из сказанного выше следует, что  $S_2 = U_2/U_1$ . При этих предположениях можно оценить средний диаметр микросфер в сжатом состоянии за фронтом УВ:  $\delta_1 = \delta_0 \sqrt{S_2/S_1} = 18$  мкм, где  $\delta_0 = 60$  мкм — средний диаметр микросфер в исходном состоянии.

Как и ожидалось, наличие пор в виде микросфер в образцах значительно увеличивает оптическое излучение из ударно-нагруженного образца. Оценки показывают, что при объемной доле микросфер 0.085 полное однократное перекрытие проекций микросфер происходит при толщине образца 0.46 мм (пример-

но 8 слоев микросфер). Это позволяет оценить яркостную температуру по профилю светимости в опыте со сплошным гетерогенным образцом (см. рис. 3, в):  $T_b = 3200$  К при давлении 20 ГПа. Амплитуда «полки» сигнала светимости ( $U_1$ ) в интервале времени  $3 \div 3.3$  мкс в опыте с монослоем микросфер (см. рис. 3, а) соответствует остаточной температуре  $T = 1440$  К, что совпадает с результатами измерения температуры (1400 К) однородной эпоксидной смолы в УВ интенсивностью  $p_s = 29$  ГПа [7]. Погрешность определения значений температуры  $\approx 8\%$ .

Масса стеклянной оболочки толщиной 1 мкм при ее начальном диаметре 60 мкм достаточна, чтобы при полном коллапсе (без учета сжимаемости стекла) сформировать сплошную микросферу диаметром  $\approx 27$  мкм. Если учесть сжимаемость стекла в УВ интенсивностью 30 ГПа [12]  $\rho_s/\rho_0 = 1.59$ , где  $\rho_s$  — плотность ударно-сжатого стекла, то диаметр сжатой микросферы будет равен  $\delta_1 \approx 23$  мкм, это значение хорошо совпадает с оценкой среднего диаметра микросфер в сжатом состоянии за фронтом УВ, сделанной выше.

Рассмотрим процесс сжатия микросферы, базируясь на результатах работы [4]. Поскольку плотность и предел прочности стекла выше, чем у эпоксидной смолы, то данные, характеризующие стекло, могут быть выбраны в качестве базовых при оценке параметров процесса сжатия микросфер. Условие реализации сжатия поры в вязком режиме [13]:  $\delta_0 \ll \delta_\mu$ , где  $\delta_\mu = 8.4\mu/[\rho_s(p_s - p_y)]^{0.5}$  — критический размер пор,  $\rho_s$ ,  $p_s$ ,  $p_y$ ,  $\mu$  — плотность, давление, предел прочности и вязкость ударно-сжатой среды соответственно. Плотность стекла можно выбрать соответствующей состоянию на ударной адиабате [12]. Тогда при  $\rho_s \approx 3.94 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $p_s = 30$  ГПа,  $p_y = 0.5$  ГПа,  $\mu = 10^3$  П критический размер поры  $\delta_\mu = 0.8 \cdot 10^{-4}$  м, что намного больше  $\delta_0 = 60 \cdot 10^{-6}$  м, поэтому условие сжатия поры в вязком режиме заведомо выполняется. Характерное время сжатия микросферы при этих параметрах  $t_\mu \approx 4\mu/(p_s - p_y) \approx 1.4 \cdot 10^{-8}$  с.

Как видно из результатов экспериментов, уменьшение амплитуды сигнала светимости в опытах с монослоем происходит меньше чем за  $10^{-7}$  с, что свидетельствует либо о быстром уменьшении температуры излучающей поверхности, либо об экранировке излучения сло-

ем ударно-сжатой смолы. Основные возможные механизмы остывания сжатой микросферы — это потери тепла за счет теплопроводности и излучения. Остывание сферического слоя за счет излучения характеризуется временем

$$\tau = \frac{\rho c_v \delta}{3\sigma} \left( \frac{1}{T_2^3} - \frac{1}{T_1^3} \right).$$

Здесь  $c_v$ ,  $\delta$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $T_1$  и  $T_2$  — теплоемкость, толщина сферического слоя, плотность, постоянная Стефана — Больцмана, начальная и конечная температуры слоя соответственно. При  $c_v \approx 10^3$  Дж/(кг·К),  $\rho = 3.94 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\delta = 10^{-5}$  м,  $T_1 = 3500$  и  $T_2 = 2500$  К это время равно  $\tau \approx 8.4 \cdot 10^{-3}$  с.

Охлаждение поверхностного слоя поры за счет теплопроводности в процессе сжатия определяется характеристическим временем  $t_a \approx r_0^2/a$  ( $a$  — температуропроводность). Если  $t_a \gg t_\mu$ , то стадия сжатия проходит без теплообмена с окружающей средой. Критический радиус, отделяющий режим сжатия с большими потерями тепла от режима с малыми потерями [4],  $r_{cr} = [4\mu_s a / (p_s - p_y - p_{g0})]^{0.5}$ , где  $p_{g0}$  — начальное давление газа внутри микросферы. При  $p_s = 30$  ГПа,  $a \approx 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с,  $\mu = 10^3$  П,  $r_0 = 30$  мкм,  $p_{g0} = 0$  он равен  $r_{cr} \approx 3.7 \cdot 10^{-8}$  м. Как отмечено выше, предельный диаметр сжатой микросферы составляет  $\approx 20$  мкм, что намного больше  $r_{cr}$ , поэтому сжатие происходит практически без потерь тепла из-за теплопроводности.

Теперь оценим заведомо сверху потери тепла сжатой микросферой за счет теплопроводности. Предположим, что микросфера и окружающая среда (матрица из эпоксидной смолы) постоянно нагреты до  $T_1 = 3.2 \cdot 10^3$  и  $T_2 = 1.5 \cdot 10^3$  К соответственно. Мощность теплопереноса на границе микросфера — эпоксидная смола  $W = [\alpha S(T_1 - T_2)]/l$ , здесь  $l$  — толщина слоя стекла, через который переносится тепло,  $\alpha$  — коэффициент теплопроводности,  $S$  — площадь поверхности микросферы. При  $\delta_1 = 2 \cdot 10^{-5}$  м,  $\alpha \approx 1$  Вт/(м·К),  $l = 10^{-6}$  м мощность составляет  $W = 2.5 \cdot 10^{-2}$  Вт. Тепловая энергия нагретой микросферы  $E = c_v \rho_s V$  (где  $V$  — объем). При  $c_v \approx 10^3$  Дж/(кг·К),  $\rho_s \approx 3.9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $T = 3.2 \cdot 10^3$  К она равна  $E \approx 5.2 \cdot 10^{-5}$  Дж. Энергия, которая переносится за интервал времени  $\Delta t$ , определяется по формуле  $\Delta E = W \cdot \Delta t$  и составляет  $2.5 \cdot 10^{-9}$  Дж за  $10^{-7}$  с. Отсюда следует, что

потери тепла за счет теплопроводности и излучения не могут объяснить спада сигнала светимости за  $\approx 10^{-7}$  с.

Как отмечалось выше, наиболее вероятная причина быстрого спада сигнала светимости от микросфер — это экранирование излучения от микросфер излучением горячего (1 400 К) слоя эпоксидной смолы в результате его ударного нагрева. Данное предположение требует проведения дальнейших исследований.

Выбор значения вязкости весьма произволен, поскольку точные данные для твердых тел при ударно-волновом нагружении практически отсутствуют (и тем более отсутствуют зависимости вязкости от температуры при высоких давлениях), а есть только оценки, полученные различными методами. Так, например, для алюминия при 31 ГПа  $\mu \approx 2 \cdot 10^4$  П, а для воды при 6.1 ÷ 8.1 ГПа  $\mu \approx 20$  П [14]. Поэтому выбор значения  $\mu \approx 10^3$  П для проводимых оценок представляется достаточно разумным. Характерное время сжатия  $t_\mu \approx 4\mu/(p_s - p_y)$  линейно зависит от вязкости, и его совпадение по порядку величины с регистрируемым временем нарастания сигнала светимости (см. рис. 3,а) также подтверждает обоснованность выбора значения вязкости. Подобные эксперименты по регистрации времени нарастания светимости при сжатии монослоя микросфер могут быть использованы для оценки вязкости прозрачных тел за фронтом УВ.

## ВЫВОДЫ

Временные характеристики пирометрических сигналов показали хорошее совпадение измеренного времени «разгорания» горячей точки с оценками времени сжатия микросфер, проведенными в рамках модели [4] при разумном выборе вязкости стекла. Это свидетельствует о том, что образование горячих точек в компаунде, состоящем из эпоксидной смолы и полых микросфер, происходит по механизму вязкопластического течения материала матрицы в окрестности поры. Амплитудные характеристики сигналов светимости позволили также оценить температуру в окрестности сжатых стеклянных микросфер — 3 200 К при давлении в УВ 20 ГПа. При этом уровне давления температура однородной ударно-нагруженной эпоксидной смолы составляет 1 100 ÷ 1 400 К. Оценка размера горячей точки пирометрическими измерениями в предположении, что сила

света, излучаемая образцом, пропорциональна площади горячей точки, дает величину 18 мкм, совпадающую с оценкой размера микросфер при условии их полного коллапса за фронтом УВ. При использовании более узких фракций микросфер, варьировании амплитуды ударной волны и вязкости матрицы данный подход может дать полезную информацию для моделирования процесса сжатия гетерогенных сред.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Боуден Ф. П., Иоффе А. Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. — М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
2. Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Лобанов В. Ф. Моделирование ударного инициирования детонации гетерогенных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 132–147.
3. Carrol M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relation for ductile porous materials // J. Appl. Phys. — 1972. — V. 43, N 4. — P. 1626.
4. Khasainov V. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S., Korotkov A. I. Two-phase visco-plastic model of shock initiation of detonation in high density pressed explosives // Proc. Seventh Symp. on Detonation. — 1981. — P. 435–447.
5. Тарасов М. Д., Карпенко И. И., Судовцов В. А., Толшмяков А. И. Измерение яркостной температуры детонационного фронта в пористом взрывчатом веществе // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 4. — С. 108–110.
6. Хасаинов Б. А., Ермолаев Б. С. Возбуждение химической реакции при ударно-волновом сжатии жидких ВВ, содержащих стеклянные микросферы // Хим. физика. — 1992. — Т. 11, № 11. — С. 1588–1600.
7. Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Хищенко К. В. Измерение яркостной температуры эпоксидной смолы при ударном сжатии // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 138–142.
8. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Измерение температуры полиметилметакрилата при ударном сжатии // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. физ. — 2011. — № 1. — С. 116–122.
9. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Караханов С. М., Зыков В. В. Критические диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 121–127.
10. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Световое излучение фторопласта в ударной волне интенсивностью 51 ГПа // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 107–115.

11. **LASL** Shock Hugoniot Data / S. P. Marsh (Ed.). — Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
12. **Экспериментальные** данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
13. **Механика** в СССР за 50 лет. Т. 2: Механика жидкости и газа / под ред. Л. И. Седова, Я. Б. Зельдовича, А. Ю. Ишлинского и др. — М.: Наука, 1970.
14. **Огородников В. А.** Вязкость и ее роль в динамических процессах. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012.

*Поступила в редакцию 20/IV 2013 г.*

---