

УДК 662.215.25:666.223.9

ТЕМПЕРАТУРА ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА ВО ВТОРИЧНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ

С. А. Бордзиловский¹, М. С. Воронин^{1,2}, С. М. Караханов¹¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru²Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

Пирометрическим методом измерена яркостная температура полиметилметакрилата, нагруженного ударной волной, отраженной от прозрачного окна из LiF или сапфира. Диапазон давления в первичной волне составлял $20 \div 40$ ГПа, а в отраженной — $30 \div 78$ ГПа. При интенсивности первичной ударной волны в диапазоне низких давлений ($19.2 \div 20.8$ ГПа) значения температуры в отраженной волне лежат на однократной ударной адиабате в пределах экспериментальной ошибки, в отличие от того, что можно было ожидать, исходя из газодинамического расчета для случая нагружения двумя ударными волнами. С ростом давления в первичной ударной волне до $38 \div 41$ ГПа значения температуры в отраженной волне $((2.4 \div 2.6) \cdot 10^3$ К) становятся меньше, чем на однократной ударной адиабате ($3.1 \cdot 10^3$ К), но остаются большими, чем рассчитанные по уравнению состояния ($2.3 \cdot 10^3$ К) в предположении инертности состава полиметилметакрилата. Сделан вывод, что подобный характер температурной зависимости связан с деполимеризацией и последующим разложением полиметилметакрилата.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, отраженная ударная волна, уравнение состояния, пирометрия.

DOI 10.15372/FGV20210613

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования поведения полимерных материалов в условиях высоких давлений и температур необходимо детальное знание их термодинамических свойств. Полное термодинамическое описание конденсированного вещества в высокоэнергетическом состоянии проводится в рамках полуэмпирических моделей уравнений состояния (УРС) [1], а свободные коэффициенты этих уравнений проверяются в контрольных экспериментах. Измеряемыми величинами в экспериментах с ударными волнами (УВ) являются, как правило, волновая и массовая скорости. На их основе для большого числа веществ построены ударные адиабаты [2] и приведены таблицы с расчетными значениями давления, плотности, степени сжатия и энергии ударно-сжатого вещества. Измерение давления и температуры при ударном нагружении значительно сложнее, чем регистрация скорости, но дает ценную информацию для построения УРС. Особенно это касается температурных измерений. Температура ударно-сжатого вещества, которая рассчитывается ис-

ходя из конкретного вида УРС, сильно зависит от заложенных в модель предположений о теплоемкости и коэффициенте Грюнайзена и является наиболее чувствительным и информативным параметром в теоретической модели УРС.

Интерес к термодинамическим свойствам полимерных материалов в условиях высоких давлений и температур обусловлен их применением в качестве конструкционных материалов. Кроме того, термодинамическое описание полимеров необходимо для численного моделирования процессов при высокой плотности энергии [3, 4]. Физико-химические изменения, возникающие в полимерах при их динамическом нагружении до нескольких десятков гигапаскалей, типичны для органических соединений и усложняют построение УРС.

Полиметилметакрилат $(C_5O_2H_8)_n$ (ПММА) представляет интерес как материал с низким динамическим импедансом, применяемый в качестве эталона при определении ударных адиабат, а также как элемент устройств, предназначенных для формирования УВ заданных амплитуды и профиля. Широкий диапазон спектрального пропускания несжатого ПММА и его прозрачность в УВ интенсивностью до 20 ГПа обуславливают

наиболее важное его применение в качестве оконного материала в пирометрических исследованиях и использование в интерферометрических системах регистрации скоростей VISAR, PDV.

Измерения температуры ПММА в области напряжений до 3 ГПа проведены в [5] при помощи тонких термопар толщиной 5 мкм и металлических фольг толщиной 1 мкм. Позднее авторы [6] проанализировали взаимодействие термопары с окружающим веществом и пришли к выводу, что толщина измерительного элемента $\approx 1 \div 2$ мкм не позволяет обеспечить временное разрешение, требуемое в экспериментах с УВ, для этого необходимо уменьшить толщину термопар до $10 \div 60$ нм.

Температурные измерения, основанные на оптических методах, имеют высокое временное разрешение и не требуют введения датчиков внутрь образца. Первые измерения яркостной и цветовой температуры при ударном сжатии ПММА проведены в [7, 8]. В этих экспериментах излучение с фронта УВ регистрировалось фотографическим методом. Измерения выполнены в диапазоне давлений $35 \div 280$ ГПа, что соответствует диапазону температур ПММА $2000 \div 13000$ К. Эти данные были тестовыми при проверке широкодиапазонного уравнения состояния ПММА [3, 9]. В [10] определялся спектр ударно-индуцированного излучения ПММА (спектрометром с временем интегрирования излучения 2 мкс) при нагружении до 22 ГПа. Спектр не описывался гладкой функцией и имел участки селективного излучения, которые авторы приближали кривой излучения абсолютно черного тела при $T = 3700 \pm 200$ К. Сравнение результатов измерений температуры при 35 ГПа [8] и при 22 ГПа [10] (диапазон средних давлений) показало сильное расхождение данных.

Ранее нами [11] была измерена яркостная температура ударно-сжатого ПММА при давлениях $22 \div 35$ ГПа при однократном сжатии и сопоставлена с экспериментальными данными [8], а также с расчетами [3, 9]. Измеренная [11] нами температура лежит на 15 % ниже данных [8] при 39.5 ГПа, однако в пределах экспериментальной ошибки (8 %) совпадает с расчетами [3, 9] в диапазоне $22 \div 39.5$ ГПа.

Новые экспериментальные данные в области фазовых превращений позволяют оценивать степень адекватности теоретических уравнений состояния, в том числе полуэмпи-

рических уравнений состояния ПММА. В этом отношении особый интерес представляют измерения температуры ударно-сжатого ПММА вдали от ударной адиабаты однократного сжатия. Такие состояния материала могут быть экспериментально реализованы в режиме ступенчатого ударного нагружения вещества последовательностью УВ. Нагружение ПММА последовательностью УВ позволяет получить данные в той области на плоскости $T-p$, которая недостижима при нагружении однократной УВ. Результаты, полученные в таких экспериментах, представляют значительный интерес для верификации уравнения состояния ПММА. Подобные эксперименты с нагружением образцов ПММА последовательными УВ проведены в ряде работ [12–17]. В [12] нагружение происходило в результате соударения двух ударников с образцами. Результаты показали, что при нагружении до 0.742 ГПа образец ПММА остается в упругом состоянии. В [13] также были поставлены эксперименты с нагружением образцов двумя последовательными УВ. Регистрация массовой скорости в ПММА на глубине $1 \div 5$ мм при нагрузке $0.5 \div 2.5$ ГПа и последующий лагранжев анализ дали возможность построить зависимость напряжение — деформация. Оказалось, что эта зависимость при повторной нагрузке идет круче, чем при первом нагружении, но остается гладкой, без изломов, которые могли бы свидетельствовать о прочностных эффектах при повторном нагружении. Авторы [14] изучали поведение ПММА и фторопласта в волнах повторного ударного сжатия и изоэнтропической разгрузки. Экспериментальные данные обобщены в форме широкодиапазонного УРС. Было отмечено, что относительно небольшое количество опытных данных и малая определенность теоретических представлений о поведении полимеров при высокой плотности энергии приводят к необходимости использования упрощенной модели УРС с ограниченным числом подгоночных параметров. Эксперименты с нагружением ряда органических жидкостей (толуол, метанол, гексан, CCl_4) двумя УВ для определения прозрачности вещества за первой УВ выполнены в [15]. Сделан вывод, что при использованных давлениях $10 \div 20$ ГПа вещество за первой УВ непрозрачно. Эксперименты по двукратному сжатию гексана, ПММА и нитрометана, а также расчет адиабаты двукратного сжатия проведены в работе [16].

В работе [17] образцы ПММА, нагруженные УВ до ≈ 45 ГПа, подвергались либо последующему нагружению до 130 ГПа, либо разгрузке. В результате построены зависимости волновая — массовая скорость и напряжение — деформация при повторном нагружении образцов ПММА. Показано, что при одном и том же напряжении сжатие во вторичной волне намного больше, чем в однократной волне. Кроме того, волны первого и повторного нагружений являются обычными плоскими УВ, и, следовательно, такая ударно-волновая структура может быть использована для исследования поведения других материалов, в том числе в области фазовых переходов.

Обзор имеющихся публикаций показал, что прямые измерения температуры ударно-сжатого ПММА немногочисленны, а при ступенчатом нагружении последовательностью УВ в диапазоне $30 \div 70$ ГПа данных по измерению температуры ударно-сжатого ПММА в доступной литературе не обнаружено. В связи с этим целью настоящей работы являлось измерение температуры при ступенчатом ударном сжатии ПММА.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проведены по схеме, показанной на рис. 1. Ударники из дюралюминия 1

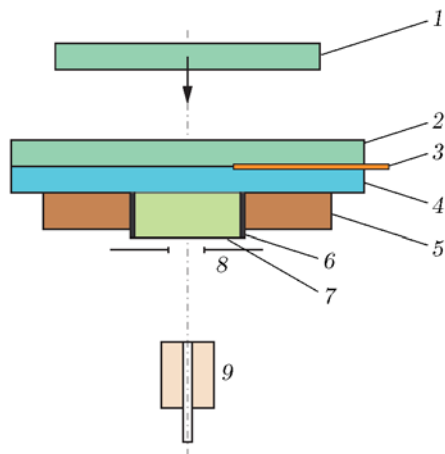


Рис. 1. Схема проведения экспериментов:

1 — ударник, 2 — экран (пластина из Д16), 3 — манганиновый датчик, 4 — образец ПММА, 5 — смесь эпоксидной смолы с графитом, 6 — пластины зачерненного алюминия толщиной 0.5 мм, 7 — окно LiF/сапфир, 8 — маска, 9 — обойма со светодиодами

разгонялись продуктами взрыва и соударялись с дюралюминиевым экраном 2, генерируя в нем однократную УВ. После распада этой УВ на границе экран — ПММА в образце 4 распространялась первичная УВ, которая проходила по образцу ПММА 4 (диаметр 70 мм, толщина $3 \div 8$ мм) до границы раздела между ПММА и окном из LiF (толщина 10 мм, поперечные размеры 20×20 мм) или сапфира (толщина 10 мм, диаметр 20 мм). Поскольку импеданс ПММА меньше импеданса материала окна, то после отражения от окна по образцу ПММА распространялась вторичная УВ с амплитудой, превышающей амплитуду первичной УВ.

Излучение ударно-сжатого ПММА при помощи кварцевого оптоволоконна выводилось из взрывной камеры, поступало на вход пирометра и регистрировалось по двум каналам с различной чувствительностью (рис. 2). Запись, полученная при максимальной чувствительности, позволяла определить с повышенной точностью моменты вхождения УВ в образец и ее отражения от окна. Скорость первой УВ в ПММА (u_{s1}) определяли по времени пробега УВ по образцу, затем по ней и известным ударным адиабатам алюминия и плексигласа [2] рассчитывали скорость ударника (w) в мо-

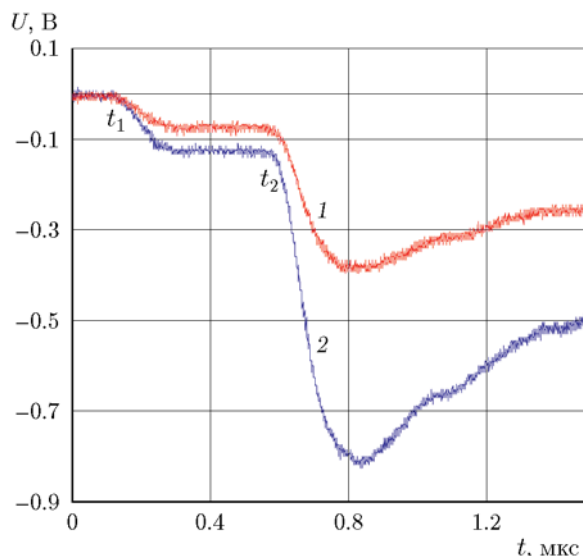


Рис. 2. Профили напряжения на фотокатодах ФЭУ:

опыт pl_27; ударник из алюминия толщиной $\delta = 3$ мм, скорость 5.9 км/с; каналы: 1 — $\lambda = 660$ нм, 2 — $\lambda = 630$ нм; t_1 — вход УВ в образец, t_2 — отражение УВ от LiF

мент соударения с экраном. В дальнейшем это значение w использовалось при моделировании циркуляции УВ в образце и расчете амплитуд p_1 , p_2 , p_3 за фронтами первичной, первой и второй отраженных УВ соответственно. Моделирование процесса нагружения ПММА ударниками с различными толщиной и скоростью проводилось с помощью программы [18].

В качестве детекторов излучения применяли фотоумножители (ФЭУ) со спектральной чувствительностью в оптическом диапазоне длин волн. В измерительных каналах между торцами световодов и ФЭУ устанавливали светофильтры, выбор которых определялся предполагаемыми значениями регистрируемой температуры. Для измерения относительно невысокой температуры в основном использовали интерференционный фильтр на линии $\lambda = 630$ (20) нм и, с целью повышения отношения сигнал/шум, широкополосный светофильтр на длине волны $\lambda = 660$ (120) нм (в скобках — полоса пропускания фильтра). Разница значений температур, измеренных при использовании различных светофильтров, не превышала $50 \div 70$ К и находилась в пределах ошибки измерений. Данные, полученные в одном опыте по разным каналам, осреднялись. Детальное описание пирометра, техника калибровки и методика расчета температуры по амплитуде сигнала светимости приведены в [19]. Временное разрешение пирометра составляло 25 нс. При обработке пирометрических сигналов использовалось приближение черного тела, т. е. определялась яркостная температура полиметилметакрилата T_b . Погрешность измерения температуры составляла не более ± 8 %.

Одновременно с излучением в отдельных опытах манганиновым датчиком регистрировали профиль давления на границе раздела экран — образец ПММА. Датчик изолировали фторопластовой пленкой толщиной 0.3 мм с каждой стороны. Для того чтобы отсечь излучение от ударно-нагруженной фторопластовой пленки, между ней и ПММА размещали алюминиевую фольгу толщиной 12 мкм. Кроме того, боковые поверхности окна были закрыты зачерненными алюминиевыми пластинками толщиной 0.5 мм, а пространство под тыльной поверхностью образца ПММА залито непрозрачной смесью эпоксидной смолы с графитом. Это сделано для того, чтобы избежать паразитной засветки от УВ, выходящей в воздух из ПММА, поскольку поперечные размеры

окон были меньше диаметра образца ПММА. В такой постановке одновременно регистрировались спектральные светимости за фронтами как первичной, так и отраженной от окна волны, что позволило уточнить параметры первичной УВ, определенные ранее [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результат расчета, соответствующего эксперименту pl_27 (см. таблицу), показан на рис. 3,а, на котором представлены профили давления в образце в координатах лагранжеских датчиков. В образце в момент t_1 возникает первичная УВ амплитудой $p_1 = 39$ ГПа, в момент t_2 она отражается от LiF и образуется вторичная УВ с амплитудой $p_2 = 66$ ГПа. Толщина ударника в этом опыте не позволяет сформироваться третьей циркуляции УВ в образце до прихода волны разгрузки с тыльной поверхности ударника.

На рис. 3,б приведен профиль интенсивности излучения, пересчитанной с помощью калибровочной зависимости в профиль некоторой функции температуры $f_T(U)$, где U — напряжение на нагрузочном сопротивлении ФЭУ. Рост этой функции характеризуется плавными фронтами, что обусловлено нарастанием толщины светящегося слоя за УВ, как это обсуждалось ранее в [20–22]. На этом профиле можно отметить две волны, передние кромки которых возникают в моменты t_1 и t_2 . Согласно теории, изложенной в [20], амплитуда яркости излучающего слоя за фронтом УВ нарастает пропорционально коэффициенту $\varepsilon(t) = 1 - \exp(-\alpha(u_s - u_p)t)$, где α — коэффициент поглощения ударно-сжатого вещества; u_s , u_p — скорости УВ и вещества за ее фронтом. Реальным значениям температуры за фронтами первой и второй УВ (T_{b1} и T_{b2}) соответствуют только те участки, где зависимость $f_T(U)$ выходит на насыщение; так, на рис. 3,б значение T_{b1} определялось в момент t_2 , а T_{b2} — на максимуме второй волны ($t \approx 1.2$ мкс).

На рис. 4,а приведены результаты моделирования с условиями опыта pl_20. В отличие от условий предыдущего опыта, в этом эксперименте в образце успевала сформироваться третья волна (отражение от границы ПММА — экран). Последовательность событий следующая: t_1 — вход УВ в образец, t_2 — первое отражение УВ от LiF, t_3 — отражение УВ от экрана, t_4 — второе отражение УВ от LiF.

Результаты определения яркостных температур в первичной и отраженной УВ

Номер опыта	p_1 , ГПа	$\pm\Delta p_1$, ГПа	T_{b1} , 10^3 К	$\pm\Delta T_{b1}$, 10^3 К	p_2 , ГПа	$\pm\Delta p_2$, ГПа	T_{b2} , 10^3 К	$\pm\Delta T_{b2}$, 10^3 К
pl_15	19.2	1.0	1.2	0.10	31.5	1.6	1.64	0.13
pl_25	20.2	1.0	1.2	0.10	33	1.7	1.6	0.13
pl_26	20.8	1.0	1.05	0.08	34.1	1.7	—	—
pl_16	28.2	1.4	1.61	0.13	45.9	2.3	2.11	0.17
pl_22	28.3	1.4	1.56	0.12	46	2.3	2.15	0.17
pl_23	28.3	1.4	1.6	0.13	46	2.3	2.25	0.18
pl_14	30.6	1.5	1.66	0.13	49.6	2.5	2.19	0.18
pl_20	32.1	1.6	1.72	0.14	52	2.6	2.35	0.19
pl_17	38	1.9	1.89	0.15	61.2	3.1	2.44	0.20
pl_13	39	2.0	1.9	0.15	62.6	3.1	2.59	0.21
pl_27	40	2.0	2	0.16	64.3	3.2	2.4	0.19
pl_24	40.9	2.0	2.2	0.18	65.76	3.3	2.6	0.21
pl_28	34.6	2.1	1.7	0.2	78.3	4.8	2.64	0.21

Примечания. p_1 , T_{b1} — параметры первой УВ (измерение), p_2 — давление во второй УВ (расчет по [18]), T_{b2} — температура в отраженной волне (измерение). При расчетах p_1 для ПММА использовалась ударная адиабата из [2]. Δp_1 — ошибка при определении давления, $\Delta T_b = 0.08T_1$ — ошибка измерения температуры.

На температурном профиле момент отражения УВ от поверхности экрана (t_3) не выделяется, поскольку свечение за фронтом третьей циркулирующей волны экранируется светящимся слоем, примыкающим к границе раздела ПММА — LiF. Поэтому слабое нарастание амплитуды на экспериментальном профиле светимости в момент t_4 соответствует второму отражению от LiF (рис. 4, б).

Результаты экспериментов суммированы в таблице, а также показаны на рис. 5 в виде пар точек для первичной и отраженной волн. На этих диаграммах представлена также расчетная зависимость $T(p)$, построенная по данным, имеющимся в литературе, и по результатам настоящей работы. Эти результаты разбиты на три группы в соответствии с интенсивностью первичной УВ и обозначены как низкие ($19.2 \div 20.8$ ГПа), промежуточные ($28.2 \div 32.1$ ГПа) и высокие ($38 \div 40.9$ ГПа) давления.

Данные по температуре образцов, ударно-сжатых в отраженной волне (рис. 5, а), при низких давлениях лежат практически точно на ударной адиабате однократного сжатия. По мере увеличения интенсивности первой УВ

(рис. 5, б) данные для отраженной волны незначительно смещаются в сторону меньших значений, и только при высоких давлениях (рис. 5, в) это отклонение становится заметным. Такая зависимость температуры от повышения давления в результате прохождения серии волн — первичной и отраженной — представляется необычной, поскольку в соответствии с термодинамическими расчетами рост температуры при квазиизоэнтропической схеме нагружения всегда меньше, чем в однократной УВ.

Такие результаты, по-видимому, связаны с физико-химическим превращением ПММА в ходе ударно-волнового нагружения. На возможное подобное превращение впервые обратили внимание авторы [7], которые провели оценки баланса тепловой и упругой энергии в ПММА при скорости УВ 16.5 км/с (соответственно $\rho = 3.15$ г/см³) и пришли к выводу, что «в условиях сжатия происходит глубокое разрушение молекулы, но на полный разрыв всех химических связей энергии не хватает». Как следует из [23], при нагреве выше 200 °С начинается заметная деполимеризация ПММА, которая с достаточно высокой скоростью протекает при температурах выше 300 °С, с выходом моно-

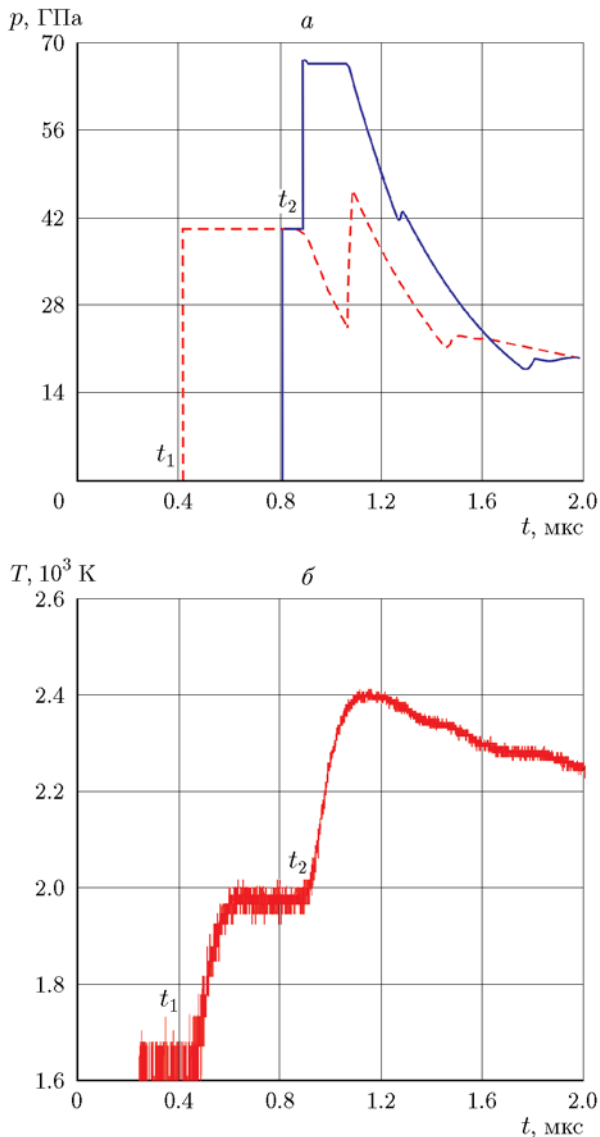


Рис. 3. Расчетные профили давления (а) и профиль откалиброванной яркости (б), соответствующие опыту pl_27:

ударник толщиной 3.0 мм, скорость 5.9 км/с, толщина экрана 3.9 мм, толщина ПММА 3.76 мм, лагранжевы датчики расположены в ПММА вблизи границ экран — образец и образец — окно на расстоянии $x_1 = 6.95$ мм (штриховая линия), $x_2 = 10.2$ мм (сплошная линия) от тыльной поверхности ударника ($x = 0$); t_1 — фронт первичной УВ, t_2 — фронт УВ, отраженной от окна

мера — метилметакрилата, поэтому следует ожидать, что при ударно-волновом нагружении, соответствующем нашим экспериментам ($T = (1 \div 2.5) \cdot 10^3$ К), происходит разложение ПММА.

Детальное определение ударных адиабат

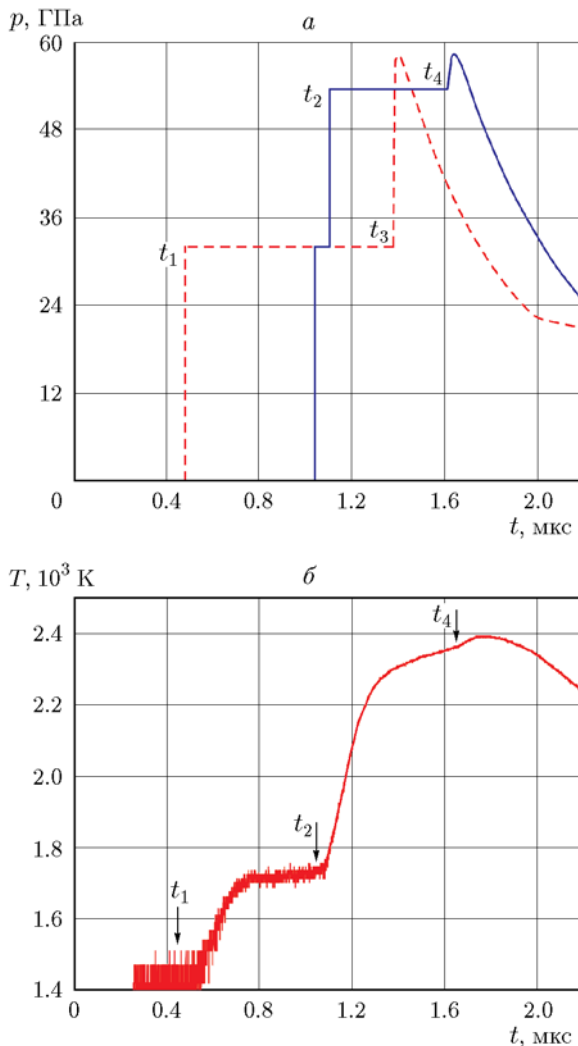


Рис. 4. Расчетные профили давления (а) и профиль откалиброванной яркости (б), соответствующие опыту pl_20:

ударник толщиной 5 мм, скорость 5.09 км/с, толщина ПММА 4.85 мм, лагранжевы датчики размещены в ПММА вблизи границ экран — образец и образец — окно на расстоянии $x_1 = 9.05$ мм (штриховая линия), $x_2 = 13.7$ мм (сплошная линия) от тыльной поверхности ударника ($x = 0$); t_1 — вход УВ в образец, t_2 — отражение УВ от LiF, t_3 — отражение УВ от экрана, t_4 — второе отражение УВ от LiF

полимеров, проведенное в [24], показало, что ПММА испытывает фазовое превращение при ударном нагружении 26 ГПа. На необходимость учета деполимеризации ПММА при ударно-волновом нагружении указывалось и в [25, 26]. В этих работах подробно рассмотрено поведение параметров, характеризующих состояние исходного ПММА (давление, удельная

энергия и др.), при движении УВ по нему в случае существования фазового перехода на фронте волны. Показано, что в зависимости от доли мономера, образовавшейся в результате фазового превращения, эти параметры заметно из-

меняются.

Естественно предполагать, что в условиях ударно-волнового нагружения разложение ПММА не ограничивается только деполимеризацией до метилметакрилата, но образуются и другие продукты, как уже отмечалось в [7], — C_{solid} , H_2 , H_2O . К сожалению, в настоящее время установить состав образующихся продуктов невозможно.

Кроме измерения яркостной температуры образцов ПММА, нагруженных отраженной УВ, в данной работе проведены ее расчеты на основе УРС, описанного в [11]. Для расчета ударных адиабат ПММА использовалось УРС, задаваемое в виде зависимости свободной энергии $F = F(\delta, T)$ от степени сжатия $\delta = \rho/\rho_0$ и температуры T . Ударная адиабата однократного сжатия рассчитывалась в два этапа. Сначала по заданным значениям плотности $\rho_i = \rho_0, \dots, \delta_{max}\rho_0$ за УВ рассчитывались соответствующие значения температуры T_i с помощью решения уравнения, выражающего закон сохранения энергии вдоль ударной адиабаты:

$$E(\delta_i, T_i) - E(1, T_0) - \frac{1}{2}(p(\delta_i, T_i) + p(1, T_0))\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_i}\right) = 0, \quad (1)$$

где

$$E(\delta, T) = F(\delta, T) - T\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_\delta, \quad (2)$$

$$p(\delta, T) = \rho_0\delta^2\left(\frac{\partial F}{\partial \delta}\right)_T. \quad (3)$$

УРС построено таким образом, что $E(1, T_0) = 0$ и $p(1, T_0) = 0$. После того, как были вычислены значения плотности ρ_i и температуры T_i вдоль

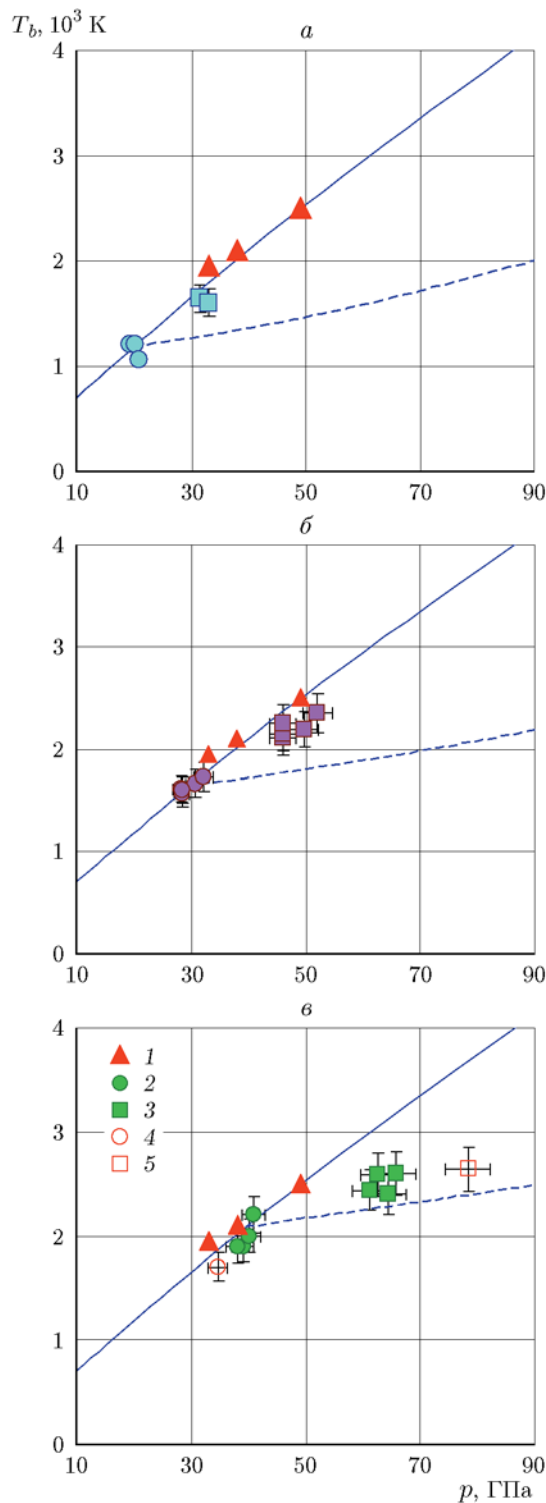


Рис. 5. Зависимость яркостной температуры от давления:

a — низкие, *б* — промежуточные, *в* — высокие давления; кружки — однократное сжатие (первичная волна): 2 — эксперименты с LiF, 4 — с сапфиром; квадраты: 3 — отражение от LiF, 5 — от сапфира; 1 — данные [8] для однократного сжатия; сплошные линии — однократная ударная адиабата, штриховые — состояния ПММА во вторичных ударных волнах, рассчитанные по УРС [11]

ударной адиабаты, с помощью уравнения (3) находили соответствующие им значения давления p_i .

Адиабаты двукратного ударно-волнового сжатия также рассчитывались в два этапа. Сначала рассчитывалось состояние среды, достигнутое при однократном ударном сжатии. Из эксперимента нам были известны давления однократного ударного сжатия p_h , поэтому для определения плотности ρ_h и температуры T_h в этом состоянии решалась система уравнений:

$$E(\delta_h, T_h) - \frac{1}{2}p_h \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_h} \right) = 0, \quad (4)$$

$$p(\delta_h, T_h) = p_h.$$

Далее по заданным значениям давления $p_i = p_h, \dots, p_{\max}$ за второй УВ находили состояния двойного ударного сжатия с помощью решения системы уравнений

$$E(\delta_i, T_i) - E(\delta_h, T_h) - \frac{1}{2}(p(\delta_i, T_i) + p_h) \left(\frac{1}{\rho_h} - \frac{1}{\rho_i} \right) = 0, \quad (5)$$

$$p(\delta_i, T_i) = p_i,$$

где первое уравнение является адиабатой Гюгонио для состояния ρ_h, T_h, p_h перед УВ. Рассчитанные ударные адиабаты показаны на рис. 5 в сравнении с соответствующими экспериментальными данными. Видно, что все значения температуры на адиабатах вторичного нагружения лежат ниже экспериментальных результатов.

Для того чтобы убедиться в том, что никакие методические ошибки (паразитная засветка и, соответственно, регистрация повышенного уровня излучения) в постановке экспериментов не могли привести к подобным результатам, были проведены эксперименты, в которых образцы ПММА заменены водой [22]. Данные, полученные в этих опытах, представлены на рис. 6. Как видно, измеренные значения яркостной температуры образцов при ударном нагружении волной, отраженной от окон из LiF и сапфира, как и предполагалось, лежат намного ниже значений на однократной ударной адиабате. Расчетные значения, полученные на адиабатах двукратного нагружения воды, хорошо совпадают с экспериментальными данными, поскольку они получены в предположении, что фазовые переходы в воде отсутствуют.

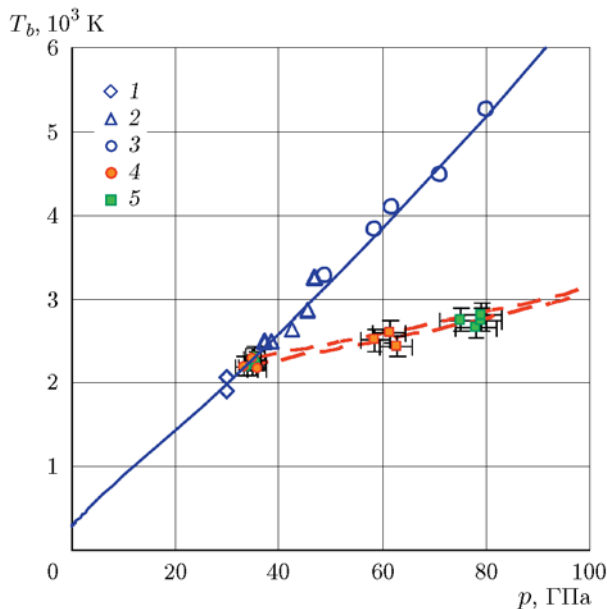


Рис. 6. Зависимости яркостных температур от давления в первичной и отраженной волнах при ударном сжатии воды:

эксперименты: 1 — [8], 2 — [27], 3 — [28], 4 — первичная УВ, 5 — отраженная УВ [22]; расчеты: сплошная линия — однократная ударная адиабата, штриховые — адиабаты двукратного нагружения (перепечатано из [22] с разрешения)

Сопоставление результатов по нагружению воды и ПММА позволяет сделать вывод, что именно разложение последнего приводит к тому, что значения температуры при двукратном нагружении лежат заметно выше, чем следовало бы ожидать, исходя из представления о неизменности структуры этого полимера при прохождении по нему УВ. Отсутствие информации о состоянии ПММА после ударно-волнового нагружения не дает возможности провести необходимую корректировку УРС и, соответственно, рассчитать адиабаты двукратного нагружения. Тем не менее мы полагаем, что полученные экспериментальные данные по температуре ПММА могут быть полезными для специалистов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены пирометрические измерения и получен массив значений яркостной температуры ударно-сжатого полиметилметакрилата вдоль и вне его ударной адиабаты в диапазоне динамических давлений $20 \div 78$ ГПа и температур $1\,200 \div 2\,600$ К.

Экспериментальные результаты сопоставлены с модельными расчетами температуры полиметилметакрилата в условиях выполненных экспериментов. Показано, что при интенсивности первичной ударной волны до 21 ГПа значения температуры во вторичной отраженной волне лежат на ударной адиабате однократного сжатия, т. е. превышают расчетные значения температуры, соответствующие нагружению двумя ударными волнами. По мере роста давления в первичной ударной волне до 38 ÷ 41 ГПа эта разница нивелируется, но все же превышает полуэмпирические расчеты ударно-сжатого ПММА в предположении неизменности его состава.

Сравнение данных, полученных на образцах ПММА, с результатами экспериментов, в которых ПММА заменен водой, дает основание сделать вывод, что подобный характер температурной зависимости определяется деполимеризацией и последующим разложением полиметилметакрилата. Сравнительные расчеты двукратных ударных адиабат для случаев ПММА и воды подтверждают этот вывод. Для понимания особенности поведения температурных зависимостей ПММА и корректного расчета температурных ударных адиабат необходимы дальнейшие исследования его состояния и состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Альтшулер Л. В.** Применение ударных волн в физике высоких давлений // *Успехи физ. наук.* — 1965. — Т. 85, № 2. — С. 197–258.
2. **Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ** / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
3. **Хищенко К. В.** Температура и теплоемкость полиметилметакрилата за фронтом сильных ударных волн // *Теплофизика высоких температур.* — 1997. — Т. 35, № 6. — С. 1002–1005.
4. **Хищенко К. В., Ломоносов И. В., Фортгов В. Е., Шленский О. Ф.** Термодинамические свойства пластиков в широком диапазоне плотностей и температур // *Докл. АН.* — 1996. — Т. 349, № 3. — С. 322.
5. **Bloomquist D. D., Sheffield S. A.** Shock compression temperature rise in polymethylmethacrylate determined from resistivity of embedded copper foils // *Appl. Phys. Lett.* — 1981. — V. 38, N 3. — P. 185–187.
6. **Gao J. X., Bai R. Sh., Cheng Ch.** Measurement of instantaneous temperature in shock-loaded nonmetallic solids // *J. Appl. Phys.* — 1990. — V. 67, N 5. — DOI: 10.1063/1.345520.
7. **Зельдович Я. Б., Кормер С. Б., Сеницын С. В., Куряпин А. И.** Температура и теплоемкость плексигласа, сжатого ударной волной // *Докл. АН СССР.* — 1958. — Т. 122, № 1. — С. 48–50.
8. **Кормер С. Б.** Оптические исследования свойств ударно сжатых конденсированных диэлектриков // *Успехи физ. наук.* — 1968. — Т. 94, № 4. — С. 641–687.
9. **Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Киричанов С. И., Ковалев А. Е., Куделькин В. Г., Лебедева Т. С., Ломайкин А. И., Мочалов М. А., Симаков Г. В., Шуйкин А. Н., Воскобойников И. М.** Экспериментальные исследования свойств ударно-сжатого карбогала. Уравнения состояния карбогала и оргстекла // *Физика горения и взрыва.* — 2004. — Т. 40, № 3. — С. 104–116.
10. **Proud W. G., Bourne N. K., Field J. E.** Shock-induced luminescence in polymethylmethacrylate // *AIP Conf. Proc.* — 1998. — V. 429, N 1. — P. 801–804. — DOI: 10.1063/1.55595.
11. **Bordzilovskii S. A., Karakhanov S. M., Merzhievskii L. A., Voronin M. S.** Temperature measurements for shocked polymethylmethacrylate, epoxy resin, and polytetrafluoroethylene and their equations of state // *J. Appl. Phys.* — 2016. — V. 120, N 13. — 135903. — DOI: 10.1063/1.4964303.
12. **Dandekar D. P., Gaeta P. J., Horie Y.** Double shock and release experiments in PMMA and Z-cut sapphire // *Shock Waves Condens. Matter.* — 1987. — P. 281–284.
13. **Dick J. J.** Stress-strain histories in shocked polymethyl methacrylate // *Shock Waves Condens. Matter.* — 1987. — P. 301–304.
14. **Бушман А. В., Жерноклетов М. В., Ломоносов И. В., Сутулов Ю. Н., Фортгов В. Е., Хищенко К. В.** Исследование плексигласа и тефлона в волнах повторного ударного сжатия и изэнтропической разгрузки. Уравнение состояния полимеров при высоких плотностях энергии // *Докл. АН.* — 1993. — Т. 329, № 5. — С. 581–588.
15. **Воскобойников И. М., Богомолов В. М., Афанасенков А. Н., Шевелев В. Н.** Определение температур органических веществ в ударных волнах // *Докл. АН.* — 1968. — Т. 182, № 4. — С. 807–810.
16. **Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф.** Описание состояния вещества за фронтом ударной волны // *Физика горения и взрыва.* — 1978. — Т. 14, № 3. — С. 105–110.
17. **Reinhart W. D., Chhabildas L. C.** Response to unloading and reloading of shock compressed polymethyl methacrylate // *AIP Conf. Proc.* — 2006. — V. 845, N 1. — P. 131–134. — DOI: 10.1063/1.2263282.

18. **Khishchenko K. V., Levashov P. R., Povarnitsyn M. E., Zakharenkov A. S.** 1D gas-dynamic simulation of shock-wave processes via Internet // AIP Conf. Proc. — 2009. — V. 1195. — P. 69–72. — <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/gassim>.
19. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М.** Измерение температуры полиметилметакрилата при ударном сжатии // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. физ. — 2011. — № 1. — С. 116–122.
20. **Модель И. Ш.** Измерение высоких температур в сильных ударных волнах в газах // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32. — С. 714–726.
21. **Boslough M. B.** A model for time dependence in shock-induced thermal radiation of light // J. Appl. Phys. — 1985. — V. 58, N 9. — P. 3394–3399. — DOI: 10.1063/1.335756.
22. **Bordzilovskii S. A., Karakhanov S. M., Khishchenko K. V.** Brightness temperature of water compressed by a double shock to pressures of 60–79 GPa // Shock Waves. — 2020. — V. 30. — P. 505–511. — DOI: 10.1007/s00193-020-00950-3.
23. **Энциклопедия полимеров.** — М.: Сов. энцикл., 1974. — Т. 2.
24. **Carter W. J., Marsh S. P.** Hugoniot equation of state of polymers // Rep. LA-2 3006-MS UC-910. — Los Alamos Nat. Lab., July 1995.
25. **Кузьмицкий И. В.** Фазовый переход на фронте ударной волны. Часть 1 — Теория и приложение к ПММА // IX Харитоновские научные чтения: сб. тр. — 2007. — С. 258–267.
26. **Кузьмицкий И. В.** Фазовый переход на фронте ударной волны. Часть 2 — Результаты вычислений для ПММА // IX Харитоновские научные чтения: сб. тр. — 2007. — С. 267–276.
27. **Peng X. J., Liu F. S., Zhang S. L., Zhang M. J., Jing F. Q.** The $C(v)$ for calculating the shock temperatures of water below 80 GPa // Sci. China: Phys., Mech. Astron. — 2011. — V. 54, N 8. — P. 1443–1446. — DOI: 10.1007/s11433-011-4396-8.
28. **Lyzenga G. A., Ahrens T. J., Nellis W. J., Mitchell A. C.** The temperature of shock-compressed water // J. Chem. Phys. — 1982. — V. 76, N 12. — P. 6282–6286. — DOI: 10.1063/1.443031.

Поступила в редакцию 10.02.2021.

После доработки 24.02.2021.

Принята к публикации 09.06.2021.
