

УДК 53.092

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В РЕЖИМЕ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ПОЛИМЕРИЗОВАННОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ

© 2022 г. Т. А. Ростилев*, В. С. Зиборов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: t.rostilov@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 14.09.2021 г.

После доработки 19.11.2021 г.

Принята к публикации 23.11.2021 г.

В экспериментах по одноосному ударному сжатию исследована структура фронта ударной волны в полимеризованной эпоксидной смоле в диапазоне давлений 0.8–2.7 ГПа. Методом лазерной интерферометрии VISAR измерены профили скорости поверхностей исследуемых образцов при выходе на них ударных волн. Получена ударная адиабата в координатах массовая скорость–скорость ударной волны. Обнаружено, что показатель степени в зависимости, связывающей максимальную скорость продольной деформации во фронте ударной волны и давление за фронтом, $\dot{\epsilon}_x \sim P^n$ равен 5.5, что превышает значение 4, характерное для сплошных твердых материалов. Рассмотрен вопрос о достижении ударными волнами стационарного режима распространения в исследованных режимах.

DOI: 10.31857/S0040364422020144

ВВЕДЕНИЕ

Эпоксидные смолы являются связующим компонентом в различных видах современных композитных материалов (КМ) [1]. КМ имеют широкое применение в устройствах и конструкциях разнообразного назначения, в том числе таких, которые в ходе эксплуатации могут подвергаться ударным нагрузкам [2]. В связи с этим является важным изучение динамики перехода вещества из невозмущенного в ударно-сжатое состояние и особенностей распространения ударных волн как в КМ, так и в материалах, являющихся его компонентами [3].

Существует ряд экспериментальных работ, в которых рассматриваются ударно-волновые свойства эпоксидных смол различного состава [2–7]. Настоящая работа посвящена изучению структуры фронта ударной волны и анализу зависимости максимальной скорости продольной деформации, реализующейся во фронте, от давления, достигаемого за ним. Эмпирическая зависимость, связывающая давление ударного сжатия P и максимальную скорость продольной деформации $\dot{\epsilon}_x$, имеет степенной вид

$$\dot{\epsilon}_x \sim P^n, \quad (1)$$

где показатель степени n близок к 4 для множества сплошных твердых материалов [8, 9]. Однако, как будет видно, это не так в случае полимеризо-

ванной эпоксидной смолы. Также известно, что для жидкостей различной природы $n = 1–3$ [10, 11].

Обязательным требованием для корректного определения скорости деформации и построения зависимости в форме соотношения (1) является достижение ударными волнами в экспериментах стационарного режима распространения [11–14]. Он реализуется при прохождении ударной волной определенного расстояния, зависящего от материала и давления нагружения. В данном режиме устанавливается равновесие между процессами, влияющими на форму фронта [9], которая практически не изменяется по мере дальнейшего распространения волны в материале.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы изготавливались из низковязкой модифицированной эпоксидной диановой смолы Этал-370, в которую добавлялся отвердитель аминного типа Этал-45М в соотношении по объему 1 : 2. Смесь сутки отвердевала при комнатных условиях в заготовке экспериментальной сборки. Плотность образцов составляла 1.15 ± 0.01 г/см³, диаметр – от 20 до 40 мм, толщины образцов h_s приведены в таблице.

В экспериментах определялись скорость ударной волны и профиль скорости исследуемой поверхности образца при выходе на нее ударной волны. Экспериментальная сборка (рис. 1) помещалась в вакуумную камеру. Плоские ударники,

Параметры экспериментов и результаты расчетов

№	Ударник	Экран	V_i , м/с	h_i , мм	h_s , мм	u_p , км/с	P , ГПа	U_s , км/с	$\dot{\epsilon}_x$, мкс ⁻¹
1	Медь	—	256	12	8.26	0.233	0.79	2.950	3.82
2	Д16т	Д16т	337	10	4.85	0.278	0.92	2.915	5.55
3	Д16т	Д16т	407	6	4.75	0.329	1.22	3.279	51.9
4	Д16т	—	414	14	13.40	0.334	1.22	3.184	48.91
5	Д16т	Д16т	419	10	5.29	0.337	1.26	3.265	72.47
6	Д16т	Д16т	422	10	4.62	0.341*	1.24*	3.169*	69.35
7	Д16т	—	435	14	14.57	0.351*	1.29*	3.184*	45.58
8	Д16т	Д16т	441	10	4.42	0.356	1.31	3.192	—
9	Д16т	Д16т	450	10	10.04	0.362	1.35	3.244	19.69
10	Д16т	Д16т	472	6	4.70	0.381	1.43	3.300	193.45
11	Д16т	—	500	13	12.88	0.402*	1.51*	3.263*	100.99
12	Д16т	Д16т	517	10	3.94	0.413	1.63	3.473	—
13	Д16т	Д16т	588	6	6.03	0.472	1.83	3.413	193.79
14	Д16т	Д16т	718	10	4.60	0.569*	2.31*	3.522*	1607.32
15	Д16т	Д16т	786	10	4.93	0.623	2.55	3.569	465.73
16	Д16т	—	800	10	8.02	0.633	2.60	3.564	1566.72
17	Д16т	—	829	10	7.26	0.656	2.70	3.572	1610.74

Примечание. Звездочками отмечены величины, рассчитанные с использованием ударной адиабаты, полученной в других экспериментах.

разгоняемые метательной установкой до скоростей 250–800 м/с, соударялись с экраном покоящейся сборки. В экране начинала распространяться ударная волна, которая затем переходила в образец. В некоторых экспериментах экран отсутствовал и ударник сразу нагружал образец. Выстрелы проводились при комнатной температуре.

Материал ударников – сплав алюминия Д16т или медь; экранов – Д16т. Диаметр ударников составлял 57 мм, толщины h_i и скорости ударников V_i приведены в таблице. Толщины экранов

составляли 1.8–1.9 мм, диаметры совпадали с диаметрами образцов.

Профиль скорости тыльной поверхности образца при выходе на нее ударной волны измерялся с помощью интерферометра VISAR [15]. Во всех экспериментах к данной поверхности прилегалo водяное окно. Отражающим слоем служила алюминиевая фольга толщиной 20 мкм (эксперименты №№ 2, 5, 8, 9 в таблице) и 7 мкм (все остальные). Сигналы с фотоэлектронных умножителей интерферометра записывались на осциллограф Agilent Infinium DSO90254A с полосой пропускания 2.5 ГГц и частотой дискретизации 20 Гвыб/с.

Измерение скорости ударника и контроль параллельности поверхностей соударения осуществлялись с помощью системы двух пар игольчатых датчиков контактного типа (пинов), расположенных на заданных расстояниях.

Скорость ударной волны рассчитывалась по известным толщинам образцов и измеряемым временам ее входа в образец и выхода. В случае если использовался экран, то время входа измерялось с помощью датчика из алюминиевой фольги толщиной 7 мкм, вклеенного между экраном и образцом. К этой фольге со стороны экрана также приклеивалась пленка-диэлектрик толщиной 4 мкм. При прохождении через такой датчик ударной волны на подключенном осциллографе регистрировался сигнал. В экспериментах без экрана время входа волны в образец регистрировалось с помощью дополнительного пятого пина, торец ко-

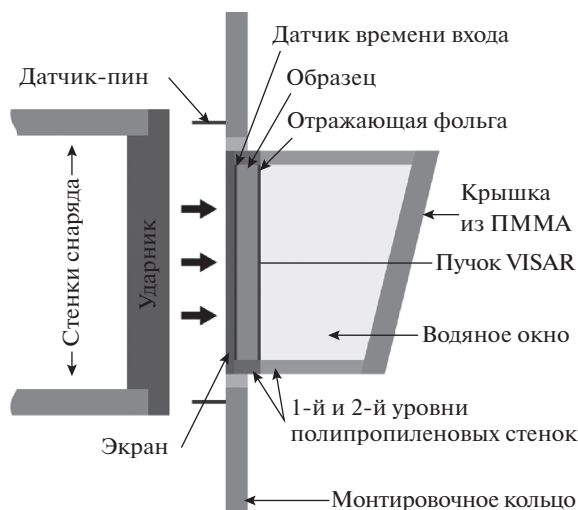


Рис. 1. Схема эксперимента; изображена только одна пара пинов.

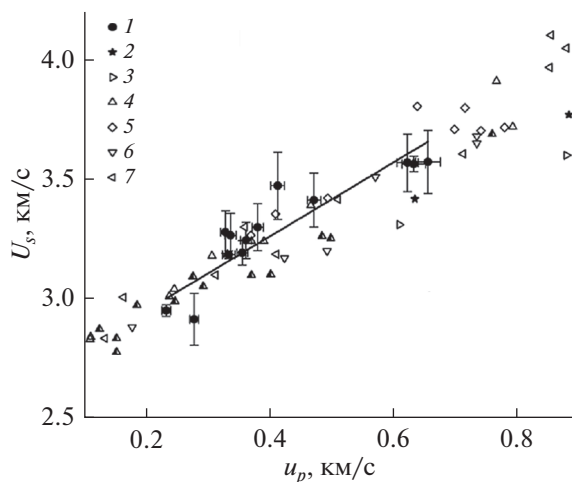


Рис. 2. Ударная адиабата в координатах массовая скорость—скорость ударной волны для эпоксидной смолы Этал-370: 1 — данные настоящей работы, 2 — [2], 3 — [3], 4 — [4], 5 — [5], 6 — [6], 7 — [7]; прямая — уравнение (2).

того лежал в плоскости соударения либо одна пара пинов размещалась заподлицо с поверхностью образца, и пятый пин не требовался. Время выхода волны на исследуемую поверхность измерялось по центральному участку фронта на профиле скорости. Погрешность определения скорости ударной волны U_s составила 3% и 2% для схем с экраном и без соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам экспериментов построена ударная адиабата эпоксидной смолы в координатах массовая скорость u_p — скорость ударной волны U_s (рис. 2). Массовая скорость рассчитывалась по

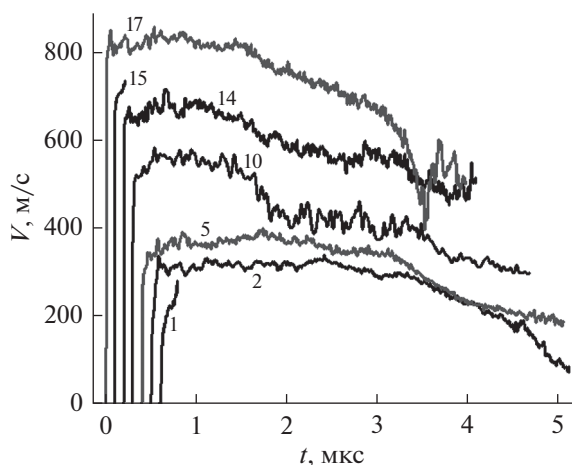


Рис. 3. Профили скорости границы эпоксидная смола—вода; для экспериментов №№ 15 и 1 доступны только фронтальные части; обозначения — см. таблицу.

методам торможения или отражения с использованием известных ударных адиабат сплава Д16т и меди [16]. В исследованном диапазоне массовых скоростей экспериментальные точки аппроксимировались линейно в виде $U_s = c_0 + bu_p$ (в км/с):

$$U_s = 2.64 + 1.55u_p, \quad (2)$$

Полученные профили представлены на рис. 3–5. С учетом различий в постановках экспериментов их формы близки между собой и в целом схожи с данными [3, 17]. Фронтальные участки профилей по форме напоминают сигмоиду (рис. 4, 5). Вначале следует участок плавного нарастания скорости до значений порядка 50–100 м/с, длящийся несколько наносекунд. Далее он сменяется участком быстрого роста, длительность и амплитуда скорости которого зависят от режима нагружения. Затем следует гораздо более продолжительная часть, на которой скорость плавно растет до максимального значения [3].

Тангенс угла наклона прямых линий на рис. 4 и 5 равен величине соответствующего профилю максимального градиента скорости, который реализовывался во фронте ударной волны. Далее для удобства изложения наряду с термином “максимальный градиент скорости” используется термин “наклон фронта” для этих линий. Наиболее заметно наклон фронта увеличивается при переходе от $P = 0.92$ к 1.22 ГПа (эксперименты №№ 2 и 3 соответственно).

Скорость продольной деформации $\dot{\epsilon}_x$ рассчитывается по формуле [8, 11, 18]

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\dot{u}_p}{U_s},$$

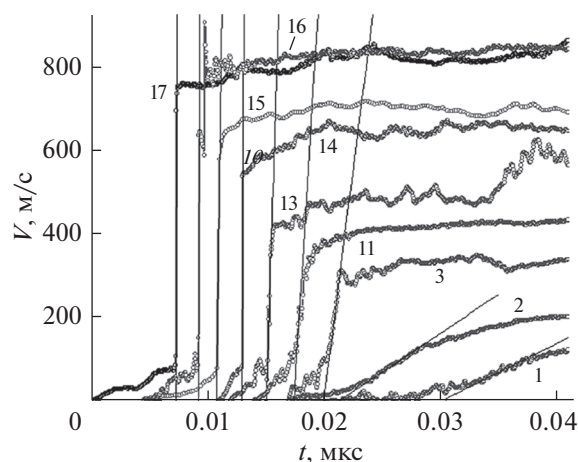


Рис. 4. Фронтальные части профилей скорости границы эпоксидная смола—вода; тангенс угла наклона каждой прямой равен значению максимального градиента скорости соответствующего профиля.

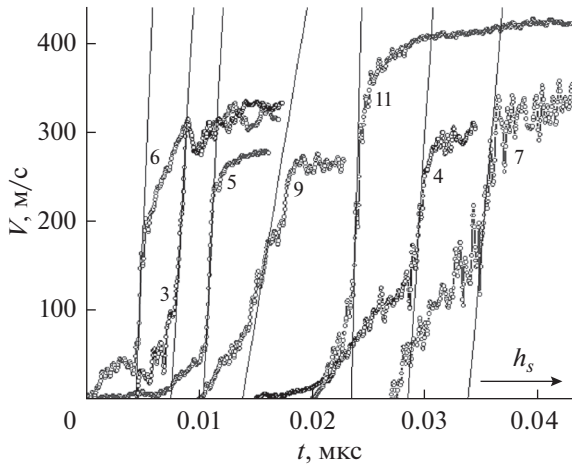


Рис. 5. Фронтальные части профилей скорости границы эпоксидная смола—вода; тангенс угла наклона каждой прямой равен значению максимального градиента скорости соответствующего профиля; некоторые профили обрезаны для удобства восприятия.

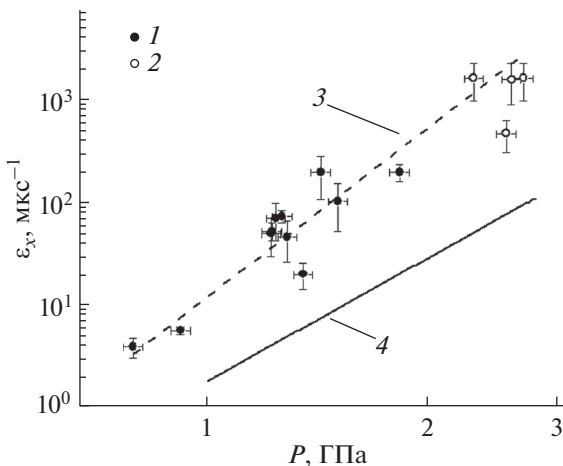


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости деформации от давления за фронтом ударной волны в логарифмических координатах; 1 — данные экспериментов №№ 14–17, 2 — данные экспериментов №№ 1–7, 9–11, 13; 3 — $\dot{\epsilon}_x \sim P^{5.5}$, 4 — $\dot{\epsilon}_x \sim P^4$.

где $\dot{\epsilon}_p$ — максимальное значение градиента массовой скорости во фронте ударной волны, в м/с^2 . Эта величина получалась путем корректировки значения максимального градиента скорости, измеренного по профилю (рис. 4, 5), с учетом различия динамических импедансов эпоксидной смолы и воды. Такое различие приводило к тому, что амплитуда скорости на профилях была выше, чем реальная амплитуда массовой скорости в образце.

Результаты расчета скорости деформации приведены в таблице. График зависимости максимальной скорости деформации от давления за фрон-

том ударной волны представлен в логарифмических координатах на рис. 6. Экспериментальные точки удовлетворительно аппроксимировались степенной зависимостью

$$\dot{\epsilon}_x = 11.8P^{5.5}, \quad (3)$$

где размерность числового коэффициента перед давлением (мкс ГПа^n)⁻¹.

При давлениях порядка 2.3 ГПа и выше (эксперименты №№ 14–17) время нарастания фронта было меньше разрешающей способности VISAR. Значения $\dot{\epsilon}_x$ в этих экспериментах рассматривались в качестве нижней границы данной величины и не учитывались при построении зависимости (3), но согласуются с ней. Эксперименты с экраном и без него не дали принципиально различных результатов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследованном диапазоне массовых скоростей полученные экспериментальные данные и описывающая их ударная адиабата согласуются с результатами предыдущих работ [2–7] (рис. 2). Ударные адиабаты эпоксидных смол в координатах $u_p - U_s$ описываются линейными зависимостями, а их значения c_0 и b близки друг к другу [7]. При этом учитывается, что при массовых скоростях порядка 3–3.2 км/с они претерпевают излом, характерный для многих полимеров [5]. Также следует отметить, что в координатах $u_p - U_s$ ударные адиабаты некоторых эпоксидных компаундов описываются квадратичной зависимостью [16].

Полученное в работе значение показателя степени n в соотношении (1) составляет 5.5, что заметно превышает значение 4, характерное для сплошных твердых материалов [8, 9]. С одной стороны, такое расхождение может быть вызвано отличиями в механизмах пластической деформации полимеров [19] и металлов. Для последних преимущественно и было получено $n \approx 4$. С другой стороны, данное расхождение может являться следствием невыполнения в экспериментах условий для достижения ударными волнами стационарного режима распространения. Наглядно эволюция фронта ударной волны на пути к стационарности продемонстрирована в работе [14] на примере ванадия при 2 ГПа: при распространении волны по веществу наклон ее фронта становится все менее крутым до тех пор, пока не пройдено определенное расстояние, после чего наклон уже не меняется заметно.

Рассмотрим детально вопрос об условиях стационарности ударных волн в эпоксидной смоле. Постоянство наклона фронта в экспериментах с одинаковыми режимами нагружения, но разными толщинами образцов будет свидетельствовать о достижении стационарного режима распростра-

нения при прохождении волной расстояния, как максимум равного наименьшей толщине образца.

На рис. 5 представлены фронтальные части профилей в экспериментах с близкими массовыми скоростями (0.329–0.362 км/с) и толщиной образцов от 4.62 до 14.57 мм. В экспериментах №№ 3, 5, 6 с толщинами $h_s = 4.62$ –5.29 мм отчетливо различается участок фронта, а значения максимального градиента скорости близки. В случае толстых образцов (эксперименты №№ 4, 7, 9) наиболее крутой участок фронта менее различим, заметны осцилляции скорости. Это обстоятельство допускает возможность неоднозначной интерпретации данных. Отметим, что уже при $u_p = 0.402$ км/с и $h_s = 12.88$ мм (эксперимент № 11) такая проблема отсутствует. В эксперименте № 9 фронт менее крутой, чем в остальных, – возможно, это следствие использования относительно толстой 20-микронной отражающей фольги.

Согласно данным [4], при $u_p = 0.1532$ км/с ударная волна в эпоксидной смоле распространяется в стационарном режиме при прохождении расстояния в 9.52 мм. С ростом массовой скорости это расстояние должно уменьшаться [12]. На основании оценки из работы [4] и близости наклонов фронтов в экспериментах №№ 3–7 можно допустить, что ударные волны в экспериментах с $u_p = 0.329$ –0.362 м/с как минимум близки к достижению стационарности. Вывод о близости к ней (а не о ее достижении) связан с тем, что формы фронтов все же меняются с увеличением толщины образцов. Но при этом на них можно выделить участки близких по своим значениям максимальных градиентов скорости (кроме эксперимента № 9). Сделанный вывод можно распространить и на эксперименты с большими массовыми скоростями, поскольку в них использовались аналогичные толщины образцов, но не с меньшими (эксперименты № 1 и 2). Выполненная оценка показывает, что толщина образцов не могла сильно повлиять на наблюдаемое значение $n = 5.5$.

Заметные участки начального плавного нарастания скорости в экспериментах №№ 4 и 7 могут свидетельствовать о выделении упругого предвестника [17], а не об эволюции фронта на пути к стационарности. Для рассмотрения этого предположения и дальнейшего исследования условий стационарного распространения необходима серия экспериментов с более толстыми образцами, для которых выделение предвестника может быть заметнее.

Согласно экспериментальным данным [20, 21], соотношение $\dot{\epsilon}_x \sim P^4$ может выполняться для некоторых КМ с эпоксидными матрицами, наполненными микрочастицами. Результаты моделирования показали, что материал матрицы, размер и материал частиц подобных КМ сильно влияют на величину n , а ее характерные значения нахо-

дятся в диапазоне 2–3 [22]. Уменьшение n с ростом концентрации дисперсного наполнителя экспериментально наблюдалось в работах [23, 24], в которых исследовалась эпоксидная смола из настоящей работы, наполненная полыми стеклянными микросферами. С ростом объемной доли микросфер, что аналогично росту пористости, n уменьшается от значения 5.5, соответствующего чистой матрице, до значений, заметно меньших 4. Важно отметить, что малые значения n для таких КМ обусловлены в том числе и их пористой структурой, а не одним лишь фактом наличия дисперсного наполнителя. Пористость материала оказывает сильное влияние на форму фронта ударной волны в нем [25] и величину n , которая, например, для различных порошков близка к единице [9]. Малое значение n (1.72) наблюдалось и в экспериментах с непористым веществом – смесью парафина и частиц полиметилметакрилата [26]. Можно предположить, что в случае КМ из работ [20, 21] согласие данных с соотношением $\dot{\epsilon}_x \sim P^4$ связано не с его универсальностью, а с ролью дисперсного наполнителя, добавление которого уменьшает характерное для чистой матрицы значение n до наблюдаемого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В полимеризованной эпоксидной смоле, подвергшейся одноосному ударному сжатию, давление и максимальная скорость продольной деформации связаны степенной зависимостью $\dot{\epsilon}_x \sim P^n$, где $n = 5.5$ при $P = 0.8$ –2.7 ГПа. Полученный показатель степени заметно выше универсального значения 4. Объяснение разницы, по-видимому, нужно искать в различии механизмов пластической деформации высокомолекулярных веществ типа эпоксидной смолы и металлов, главным образом для которых выполняется $n \approx 4$.

Для давлений порядка 1.3 ГПа экспериментально показана эволюция формы фронта ударной волны при прохождении ею расстояния в диапазоне 4.62–14.57 мм. Форма фронта несколько менялась с увеличением расстояния, пройденного волной, что, однако, не сильно повлияло на определяемые значения максимальной скорости продольной деформации.

Полученные результаты и оценки, сделанные по имеющимся в литературе данным, показывают, что режимы распространения ударных волн почти во всех экспериментах как минимум близки к стационарным. Это обстоятельство позволяет заключить, что выбор толщин образцов и полученное значение $n = 5.5$ корректны.

Авторы выражают благодарность А.С. Савиных за ценные комментарии, высказанные во время подготовки настоящей публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уткин А.В., Мочалова В.М., Якушев В.В., Рыкова В.Е., Шакула М.Ю., Острик А.В., Ким В.В., Ломоносов И.В. Импульсное сжатие и растяжение композитов при ударно-волновом воздействии // ТВТ. 2021. Т. 59. № 2. С. 189.
2. Bushman A.V., Efremov V.P., Fortov V.E., Kanel' G.I., Lomonosov I.V., Ternovoi V.Ya., Utkin A.V. Equation of State of Composites under High Energy Densities. In: Shock Compression of Condensed Matter 1991 / Eds. Schmidt S.C., Dick R.D., Forbes J.W., Tasker D.G. Elsevier Sci. Publ. B., 1992. P. 79.
3. Мочалова В.М., Уткин А.В., Павленко А.В., Малюгина С.Н., Мокрушин С.С. Импульсное сжатие и растяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 1. С. 126.
4. Munson D.E., May R.P. Dynamically Determined High Pressure Compressibilities of Three Epoxy Resin Systems // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 962.
5. Carter W.J., Marsh S.P. Hugoniot Equation of State of Polymers. Los Alamos Report LA-13006-MS. New Mexico, US: Los Alamos Nat. Lab., 1995. 25 p.
6. Millett J.C.F., Bourne N.K., Barnes N.R. The Behavior of an Epoxy Resin under One-dimensional Shock Loading // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. № 11. P. 6590.
7. Hazell P.J., Stennett C., Cooper G. The Shock and Release Behavior of an Aerospace-grade Cured Aromatic Amine Epoxy Resin // Polym. Compos. 2008. V. 29. P. 1106.
8. Swegle J.W., Grady D.E. Shock Viscosity and the Prediction of Shock Wave Rise Times // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. № 2. P. 692.
9. Grady D.E. Structured Shock Waves and the Fourth-power Law // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. 013506.
10. Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушение жидкостей при интенсивных воздействиях // Физ. мезомех. 2016. Т. 19. № 3. С. 69.
11. Канель Г.И., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В. Оценка вязкости глицерина по ширине слабой ударной волны // ТВТ. 2017. Т. 55. № 2. С. 380.
12. Johnson J.N., Barker L.M. Dislocation Dynamics and Steady Plastic Wave Profiles in 6061-T6 Aluminum // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. № 11. P. 4321.
13. Gilman J.J. Resistance to Shock-front Propagation in Solids // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. № 6. P. 4059.
14. Swegle J. Non-steady Wave Profiles and the Fourth-power Law. In: Shock Compression of Condensed Matter 1991 / Eds. Schmidt S.C., Dick R.D., Forbes J.W., Tasker D.G. Elsevier Sci. Publ. B., 1992. P. 249.
15. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4669.
16. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. 446 с.
17. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. М.: Физматлит, 2008. 248 с.
18. Савиных А.С., Гаркушин В.С., Канель Г.И., Разоренов С.В. Оценка вязкости расплава Bi – 56.5%, Pb – 43.5% по ширине слабой ударной волны // ТВТ. 2018. Т. 56. № 5. С. 711.
19. Zaretsky E.B., Kanel G.I. Response of Poly(Methyl Methacrylate) to Shock-wave Loading at Elevated Temperatures // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. 085902.
20. Setchell R.E., Anderson M.U. Shock-compression Response of an Alumina-filled Epoxy // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. 083518.
21. Vogler T.J., Alexander C.S., Wise J.L., Montgomery S.T. Dynamic Behavior of Tungsten Carbide and Alumina Filled Epoxy Composites // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. 043520.
22. Vogler T.J., Borg J.P., Grady D.E. On the Scaling of Steady Structured Waves in Heterogeneous Materials // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. 123507.
23. Зиборов В.С., Канель Г.И., Ростиллов Т.А. Экспериментальное исследование характера деформации сферопластиков при ударном сжатии // ФГВ. 2020. Т. 56. Вып. 2. С. 124.
24. Rostilov T.A., Ziborov V.S. Experimental Study of Shock Wave Structure in Syntactic Foams under High-velocity Impact // Acta Astronaut. 2021. V. 178. P. 900.
25. Davison L. Shock-wave Structure in Porous Solids // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 5503.
26. Zaretsky E.B., Kanel G.I., Kalabukhov S. Shock Compression of Paraffin-polymethylmethacrylate (PMMA) Mixture // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. 245902.