УДК: 53.092

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-90-97

СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ В ПОЛИМЕРИЗОВАННОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ

Зиборов В. С., Ростиллов Т. А.

*Объединённый институт высоких температур Российской академии наук
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Российская Федерация*

Аннотация. Исследованы ударно-волновые свойства модифицированной эпоксидной смолы Этал-370, полимеризованной отвердителем Этал-45М. Измерена ударная адиабата в координатах массовая скорость – скорость ударной волны; она не отличается от ранее полученных ударных адиабат эпоксидных смол на масштабе исследованного диапазона массовых скоростей. Обнаружено, что степенная зависимость скорости деформации во фронте ударной волны от давления за её фронтом имеет показатель 6,3, что превышает ранее полученную для сплошных твёрдых материалов обобщающую степень 4.

Ключевые слова: ударная волна, VISAR, эпоксидная смола, ЭТАЛ-370, ЭТАЛ-45М, ударная адиабата, скорость деформации

DEFORMATION RATE UNDER SHOCK COMPRESSION IN POLYMERIZED EPOXY RESIN

V. Ziborov, T. Rostilov

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
ul. Izhorskaya 13, stroenie 2, 125412 Moscow, Russian Federation*

Annotation. The properties of the Etal-370 epoxy resin polymerized with the Etal-45M hardener are investigated by laser interferometry (VISAR) under shock compression in the pressure range from 0.92 to 2.55 GPa. The shock adiabat in the mass velocity coordinates, i.e. the velocity of the shock wave, is obtained. It is found that the power dependence of the deformation rate in the shock wave front on the pressure behind its front has an index of 6.3, which significantly exceeds the generalizing degree of 4 obtained for solid materials.

Keywords: shock compression wave, VISAR, epoxy resin, ETAL-370, ETAL-45M, shock adiabat, deformation rate

Введение

Эпоксидные смолы находят широкое применение в качестве матриц современных композиционных материалов (КМ). Сами КМ играют ключевую роль во многих современных областях науки и техники, в том числе в аэрокосмической и оборонной отраслях [1]. В этих областях критически необходимы эксперимен-

тальные данные о поведении композиционных материалов и отдельных их составляющих в условиях ударных нагрузок [2], на основе которых верифицируются и создаются расчётные модели.

Эксперимент

Целью экспериментов было определение профиля ударной волны и скорости её распространения в образце. Образцы изготавливались из коммерчески доступной низковязкой модифицированной эпоксидной смолы марки Этал-370, полимеризованной с использованием отвердителя Этал-45М. Отвердитель добавлялся в соотношении 1/2, затем образец сутки подвергался холодному отверждению. Плотность полученных цилиндрических образцов составляла $1,15 \text{ г/см}^3$, диаметр составлял от 30 до 40 мм, толщина от 3,94 до 10,04 мм.

Эксперименты по ударному нагружению проводились в следующей постановке: ударник, разгоняемый в пороховой пушке, плоскопараллельно соударялся с экраном цилиндрической экспериментальной сборки, через который в образец вводилась ударная волна (УВ). При достижении ударной волной фольги-отражателя, расположенной между образцом и водяным окном, измерялся профиль скорости этой фольги с помощью лазерного интерферометра VISAR [3] (рис. 1). Этот профиль интерпретировался как профиль ударной волны, выходящей из эпоксидной смолы на границу с водяным окном, ввиду относительно малой толщины фольги, которая составляла от 7 до 20 мкм.

Рис. 1. Схема экспериментов. 1 – ударник, 2 – монтажное кольцо, 3 – пины,

4 – экран, 5 – датчик измерения времени входа волны в образец, 6 – образец, 7 – отражающая фольга, 8 – водяное окно, 9 – крышка окна из ПММА, 10 – луч VISAR.

Скорость ударника определялась по последовательному замыканию им системы из четырёх датчиков-пинов. Материал ударника и экрана – сплав алюминия

Д16Т, фольги – алюминий. Толщина экрана составляла от 1,8 до 1,9 мм. Так же по известным меткам времени входа волны в образец и выхода из него измерялась скорость распространения ударной волны в образце. Метка входа определялась с помощью поляризационного датчика в форме фольги, расположенного между образцом и экраном. Метка выхода определялась по сигналам VISAR. Характеристики образцов и параметры экспериментов представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Результаты экспериментов

№	Скорость ударника V_b , км/с	Толщина ударника h_b , мм	Толщина образца h_s , мм	Скорость УВ D , км/с	Массовая скорость u , км/с	Давление P , ГПа	Скорость деформации $\dot{\epsilon}_s$, мкс ⁻¹
1	0,337	10	4,85	2,915	0,278	0,92	5,55
2	0,419	10	5,29	3,265	0,337	1,26	72,46
3	0,422	10	4,62	3,210*	0,346*	1,28*	69,45
4	0,718	10	4,60	3,563*	0,568*	2,33*	1586,01
5	0,786	10	4,93	3,569	0,623	2,55	465,71
6	0,450	10	10,04	3,244	0,362	1,35	19,69
7	0,407	6	4,75	3,279	0,329	1,22	51,90
8	0,472	6	4,70	3,300	0,381	1,42	193,45
9	0,588	6	6,03	3,413	0,472	1,83	193,79
10	0,441	10	4,42	3,192	0,356	1,31	–
11	0,517	10	3,94	3,473	0,413	1,63	–

* Звёздочками отмечены величины, рассчитанные с использованием адиабаты, полученной в других экспериментах. Они использовались только для расчёта скорости деформации.

Результаты

По результатам экспериментов была построена ударная адиабата в координатах массовая скорость u [км/с] – скорость ударной волны D [км/с]. Массовая скорость рассчитывалась по методу отражения [4] с использованием известных характеристик материалов ударника и экрана [5]. Экспериментальные точки линейно аппроксимировались зависимостью:

$$D = 2,66 + 1,59u \text{ [км/с]}. \quad (1)$$

Полученные профили УВ представлены на рис. 2. Они имеют стандартный для полимеров вид [6].

Рис 2. Экспериментальные профили ударных волн в эпоксидной смоле.

а) – образцы, нагруженные ударником толщиной 10 мм, б) – образцы, нагруженные ударником толщиной 6 мм.

Ударная адиабата близка к тем, что были получены ранее, и которые так же имеют линейный вид [2; 7]. Однако, в некоторых исследованиях адиабаты эпоксидных смол описываются квадратической зависимостью, но на гораздо большем диапазоне массовых скоростей [5].

С помощью профилей по простому соотношению определялась скорость деформации при ударном сжатии [8]:

$$\dot{\epsilon}_x = k \frac{\dot{u}_p}{D} [\text{с}^{-1}], \quad (2)$$

где $\dot{u}_p$ [м/с²] – максимальный градиент скорости во фронте профиля, k [безразм.] – коэффициент, учитывающий различие динамических импедансов материалов образца и окна.

На рис. 3 представлен принцип измерения максимального градиента для некоторых экспериментов в близких режимах нагружения. Заметно, что в относительно толстом образце (эксперимент №6), фронт УВ оказывается сильно сглаженным, что очевидно связано с её затуханием. В экспериментах №4 и №5, в которых реализовывались давления нагружения порядка 2,5 ГПа, ширина фронта не могла быть измерена корректно, поскольку она оказывалась меньше временной разрешающей способности метода. В связи с вышеизложенным результаты этих трёх экспериментов не были использованы при построении финальной зависимости.

Рис 3. Фронты экспериментальных профилей ударных волн в эпоксидной смоле в наносекундном диапазоне.

Получена степенная зависимость скорости деформации от давления за фронтом УВ (рис. 4):

$$\dot{\epsilon}_x = 1,35 \cdot 10^7 P^{6,3}. \quad (3)$$

Рис. 4. Зависимость скорости деформации от давления за фронтом ударной волны для эпоксидной смолы. Стрелочкой отмечено «выпадение» эксперимента №5 из общей зависимости.

Показатель степени 6,3 для исследованной эпоксидной смолы оказывается больше полученной ранее для различных металлов и некоторых других твёрдых

веществ обобщающей степени 4 [9]. Однако, необходимо отметить, что в этом исследовании значения отдельных показателей лежали в диапазоне от 3,5 до 4,6. В недавней работе для титана была получена степень 3,43 [10]. Неопределённость в такого рода измерениях связана как с разрешающей способностью измерительной техники, так и с некоторой вольностью в том, по каким участкам профиля экспериментатор измеряет максимальный градиент скорости. Также свою роль в «сглаживании» профиля играет и толщина отражающего слоя.

Заключение

Ударная адиабата модифицированной эпоксидной смолы Этал-370, полимеризованной с помощью отвердителя Этал-45м, не отличается от адиабат других эпоксидных смол в исследованном диапазоне массовых скоростей. Показатель 6,3 степенной зависимости скорости деформации от давления за фронтом ударной волны оказывается больше, чем ранее полученный для сплошных твёрдых веществ обобщающий показатель 4. Для дальнейшего анализа подобного рода зависимостей необходимы новые экспериментальные данные, полученные разными исследователями.

Статья поступила в редакцию 17.09.2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др; под ред. Берлина А. А. СПб: Профессия, 2008. 560 с.
2. Hazell P. J., Stennett C., Cooper G. The shock and release behavior of an aerospace-grade cured aromatic amine epoxy resin // Polymer Composites. 2008. Vol. 29. Iss. 10. P. 1106–1110.
3. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43. P. 4669–4675.
4. Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот тысяч до четырех миллионов атмосфер / Альтшулер Л. В., Крупников К. К., Леденев Б. Н., Жучихин В. Л., Бражник М. И. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1958. Т. 34. № 4. С. 874–885.
5. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. 446 с.
6. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах / Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 248 с.
7. Munson D. E., May R. P. Dynamically determined high pressure compressibilities of three epoxy resin Systems // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43. Iss. 3. P. 962–971.
8. Оценка вязкости глицерина по ширине слабой ударной волны / Канель Г. И., Савиных А. С., Гаркушин Г. В., Разоренов С. В. // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №3. С. 380–395.
9. Swegle J. W., Grady D. E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // Journal of Applied Physics. 1985. Vol. 58. Iss. 2. P. 692–701.

10. Изменение кинетики ударно-волнового деформирования и разрушения титана ВТ1-0 в результате отжига / Канель Г. И., Разоренов С. В., Гаркушин Г. В., Павленко А. В., Малюгина С. Н. // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. Вып. 6. С. 1153–1160.

REFERENCES

1. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S. et al. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2008. 560 p.
2. Hazell P. J., Stennett C., Cooper G. The shock and release behavior of an aerospace-grade cured aromatic amine epoxy resin. In: *Polymer Composites*, 2008, vol. 29, iss. 10, pp. 1106–1110.
3. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. In: *Journal of Applied Physics*, 1972, vol. 43, pp. 4669–4675.
4. Al'tshuler L. V., Krupnikov K. K., Ledenev B. N., Zhuchikhin V. L., Brazhnik M. I. [Dynamic Compressibility and Equation of State of Iron under High Pressure]. In: *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1958, vol. 34, no. 4, pp. 874–885.
5. Trunin R. F., Gudarenko L. F., Zhernokletov M. V., Simakov G. V. *Eksperimental'nye dannye po udarno-volnovomu szhatiyyu i adiabaticheskomu rasshireniyu kondensirovannykh veshchestv* [Experimental data on shock-wave compression and adiabatic expansion of condensed materials]. Sarov, Russian Federal Nuclear Center, All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ., 2001. 446 p.
6. Kanel' G. I., Razorenov S. V., Utkin A. V., Fortov V. E. *Eksperimental'nye profili udarnykh voln v kondensirovannykh veshchestvakh* [Experimental profiles of shock waves in condensed substances]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 248 p.
7. Munson D. E., May R. P. Dynamically determined high pressure compressibilities of three epoxy resin Systems. In: *Journal of Applied Physics*, 1972, vol. 43, iss. 3, pp. 962–971.
8. Kanel' G. I., Savinykh A. S., Garkushin G. V., Razorenov S. V. [Evaluation of glycerol viscosity through the width of a weak shock wave]. In: *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 2017, vol. 55, no. 3, pp. 380–395.
9. Swegle J. W., Grady D. E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times. In: *Journal of Applied Physics*, 1985, vol. 58, iss. 2, pp. 692–701.
10. Kanel G. I., Razorenov S. V., Garkushin G. V., Pavlenko A. V., Malyugina S. N. [Change of the kinetics of shock-wave deformation and fracture of VT1-0 titanium as a result of annealing]. In: *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2016, vol. 58, no. 6, pp. 1153–1160.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зиборов Вадим Серафимович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: ziborov.vs@yandex.ru;

Ростилов Тимофей Андреевич – младший научный сотрудник Лаборатории ударно-волновых воздействий Объединённого института высоких температур Российской академии наук;
e-mail: t.rostilov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim S. Ziborov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Shock Wave Effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: ziborov.vs@yandex.ru;

Timofey A. Rostilov – Junior Researcher at the Laboratory of Shock Wave Effects, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;

e-mail: t.rostilov@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Зиборов В. С., Ростиллов Т. А. Скорость деформации при ударном сжатии в полимеризованной эпоксидной смоле // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика и математика. 2019. № 4. С. 90–97.

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-90-97

FOR CITATION

Ziborov V. S., Rostilov T. A. Deformation rate under shock compression in polymerized epoxy resin In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*. 2019, no. 4, pp. 90–97.

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-90-97