

УДК 539.3
ББК В251

Михаил Сергеевич Воронин

младший научный сотрудник,
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
(Новосибирск, Россия), e-mail: mihause@academ.org

Лев Алексеевич Мерзиевский

доктор физико-математических наук, профессор,
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук
(Новосибирск, Россия), e-mail: merzh@hydro.nsc.ru

Моделирование ударно-волнового деформирования политетрафторэтилена¹

Для описания поведения политетрафторэтилена под действием нагрузки построена модель упруговязкого тела максвелловского типа. Особенностью модели являются определяющие соотношения: время релаксации касательных напряжений и уравнение состояния среды при нешаровом тензоре деформации. Время релаксации строится с учетом того, что в полимерах возможен набор различных термо-флуктуационных процессов релаксации. При построении уравнения состояния уделено внимание сравнению результатов расчётов и доступных данных температуры ударно-сжатого материала. Решены задачи распространения, взаимодействия и отражения от свободной поверхности ударной волны и волны разгрузки.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, фторопласт, тефлон, уравнение состояния, время релаксации, ударно-волновые процессы.

Mikhail Sergeevich Voronin

Junior Researcher,
Lavrent'yev Institute of Hydrodynamics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
(Novosibirsk, Russia), e-mail: anchouse@ngs.ru

Lev Alekseevich Merzhievskiy

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,
Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
(Novosibirsk, Russia), e-mail: merzh@hydro.nsc.ru

Modeling of Shock Deformed Polytetrafluoroethylene

A model of viscoelastic body of Maxwell's type is developed to describe behavior of loaded polytetrafluoroethylene. The characteristic feature of the model are the defining relations: relaxation time of shear stresses and equation of state (EoS) with non-spherical deformations tensor. Relaxation time function is developed taking into account the fact that there are a number of thermo-fluctuating relaxation processes in polymers. The results of EoS calculations are also compared with available data of shock temperature. The model is used for simulating of propagation, interaction and reflection from a free surface of shock and unloading waves.

Keywords: polytetrafluoroethylene, teflon, equation of state, relaxation time, shockwave processes.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт, тефлон) по фазовому состоянию относится к классу кристаллических полимеров. В отличие от обычных кристаллических твердых тел кристаллические полимеры не являются полностью поликристаллами, а содержат как кристаллические, так и аморфные участки, а также области с промежуточными степенями упорядоченности. Если в полимере больше 40% кристаллической фазы, то его относят к кристаллическим. Обычно кристаллические полимеры обладают большей прочностью, меньшей текучестью, чем аморфные. В зависимости

¹Работа выполнялась при поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 64 и гранта РФФИ № 12-01-00726-а.

от интенсивности приложенной нагрузки такие полимеры могут проявлять свойства, характерные как для аморфных, так и для кристаллических сред. Каждому из возможных состояний соответствует свой набор микро-, мезо- и макроструктурных механизмов необратимого деформирования. При этом последовательно активируются механизмы деформирования, связанные с гибкостью макромолекул и конформационными переходами, с перемещениями и перестройками надмолекулярных образований, а также с ростом кристаллитов (областей кристалличности) или их плавлением (фазовыми переходами). В квазистатических процессах переход из одного физического состояния в другое происходит при изменении температуры и сопровождается изменением микроскопических и макроскопических свойств.

В данной работе для описания поведения политетрафторэтилена $(CF_2)_n$ строится модель упруговязкого тела максвелловского типа. Развиваемый подход к построению моделей деформирования полимеров ранее применялся для описания свойств и поведения аморфных полимеров [1]. Принципиальной особенностью подхода является включение в определяющие соотношения времени релаксации касательных напряжений в форме непрерывной зависимости от параметров, характеризующих состояние среды. Аналитический вид зависимости выбирается на основе учета микро- и мезоструктурных механизмов необратимого деформирования. Для замыкания модели строится уравнение состояния среды, включающее зависимость энергии от второго инварианта тензора деформаций. Такой подход позволяет получить единообразное математическое описание всех физических состояний полимеров. Модели такого типа для поликристаллических тел так же дали хорошие результаты в описании ударно-волновых процессов [2].

В используемом далее одномерном случае система имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho r^\nu)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u r^\nu)}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial(\rho u r^\nu)}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho u^2 - \sigma_1) r^\nu]}{\partial r} + \nu r^{\nu-1} \sigma_2 = 0, \\ \frac{\partial[\rho(E + u^2/2) r^\nu]}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho u(E + u^2/2) - \sigma_1 u) r^\nu]}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial h_2}{\partial t} + u \frac{\partial h_2}{\partial r} - \frac{\nu(3-\nu)u}{2} \frac{u}{r} &= -\frac{d_2}{\tau}, \quad \frac{\partial h_3}{\partial t} + u \frac{\partial h_3}{\partial r} - \frac{\nu(\nu-1)u}{2} \frac{u}{r} = -\frac{d_3}{\tau}, \\ E = E(\delta, D, S), \quad \sigma_i &= \rho \left(\frac{\partial E}{\partial h_i} \right)_S, \quad T = \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_{\delta, D}, \quad \tau = \tau(\sigma_i, T), \\ \delta = \frac{\rho}{\rho_0} &= \exp \left(-\sum_{i=1}^3 h_i \right), \quad d_i = h_i - \frac{1}{3} \ln \delta, \quad D = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^3 d_i^2 \right). \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ, u, E, S, T – плотность, скорость, удельная внутренняя энергия, энтропия и температура; σ_i – главные напряжения; h_i – логарифмы коэффициентов растяжения элемента среды вдоль главных осей; t, r – время и пространственная переменная; $E(\delta, D, S)$ – уравнение упругой энергии при нешаровом тензоре деформаций; $\tau(\sigma_i, T)$ – зависимость времени релаксации касательных напряжений от параметров состояния среды, ν – показатель симметрии: $\nu = 0$ – плоская, $\nu = 1$ – цилиндрическая, $\nu = 2$ – сферическая; δ и D – первый и второй инварианты тензора деформаций. Уравнения записаны в системе координат, совпадающей с главными осями тензоров напряжения и деформаций (в данном случае они совпадают).

Для описания ударно-волновых и высокотемпературных процессов в широком диапазоне изменения термодинамических параметров в кристаллических и поликристаллических средах наибольшее распространение получили уравнения состояния на основе подхода Ми-Грюнайзена [4; 5]. Согласно этому полумпирическому подходу, какой-либо термодинамический потенциал (например, внутренняя или свободная энергия) представляется в виде суммы холодной (упругой) составляющей, соответствующей сжатию вещества при 0°K , и определяемые термическим возбуждением тепловые члены.

Хорошие результаты в описании экспериментальных данных и реальных процессов в поликристаллических телах, полученные с использованием данного подхода, стали основанием для его распространения и на аморфные среды. При этом возникает ряд дополнительных особенностей, связанных со строением полимерных сред.

Используя принципы, сформулированные в [5], и ограничившись диапазоном давлений до ~ 100 ГПа, представим свободную энергию в виде:

$$F(\delta, D, T) = F_x(\delta) + F_d(\delta, D) + F_t(\delta, T), \quad (2)$$

где F_x , F_d , F_t – упругая (холодная), девиаторная и тепловая составляющие соответственно. При наличии достаточного количества экспериментальных данных тепловую составляющую разделяют на вклады от атомов F_a и электронов F_e .

Функциональные зависимости для холодной и тепловой составляющих энергии выбирались с использованием имеющейся в литературе информации по этому вопросу [6–8]. Для девиаторного слагаемого выбрана линейная зависимость от второго инварианта тензора деформаций. В результате составляющие энергии (2) имеют вид:

$$\begin{aligned} F_x(\delta) &= V_0 \left(\frac{a\delta^{m-1}}{m-1} + \frac{b\delta^{n-1}}{n-1} \right) - F_{X0}, \\ F_d(\delta, D) &= 2c_{\perp}^2 \delta^{\xi_0} D, \\ F_t(\delta, T) &= F_a(\delta, T) + F_e(\delta, T) = R_{\mu} T \sum_{i=1}^3 N_i \ln(1 - e^{-x_i}) + TN_e \ln(1 - e^{-x_e}), \\ x_{i,e} &= \frac{\theta_{i,e}(\delta)}{T}, \quad \theta_{i,e} = \theta_{0i,0e} \delta^{\gamma_{0i,0e}}. \end{aligned} \quad (3)$$

где $V_0 = 1/\rho_0$; a, b, m, n – имеют смысл интерполяционных констант; константа F_{X0} выбирается из условия $F_X(1) = 0$; c_{\perp} – поперечная скорость звука; ξ_0 – интерполяционная константа; R_{μ} – универсальная газовая постоянная, делённая на молярную массу; θ_{0i} – характеристические температуры, определяемые по экспериментальным данным теплоемкости; γ_{0i} – интерполяционные константы, имеющие смысл аналогов коэффициента Грюнайзена, для соответствующих колебательных мод; N_i – интерполяционные константы, удовлетворяющие условию $\sum N_i = N$, где N – полное число колебательных мод; $N_e, \theta_{0e}, \gamma_{0e}$ – интерполяционные константы тепловой составляющей F_e , смысл которых подобен смыслу аналогичных констант в F_a .

Значения интерполяционных констант в зависимостях (3) выбирались из условия наилучшего описания всей совокупности доступных экспериментальных данных, большая часть которых содержится на интернет-сайте [10].

На рис. 1, рис. 2 сплошными линиями показаны ударная адиабата и изэнтропы разгрузки ПТФЭ, рассчитанные по построенному уравнению состояния, в сравнении с экспериментальными данными [10]. Экспериментальные данные изэнтропы разгрузки взяты из [11].

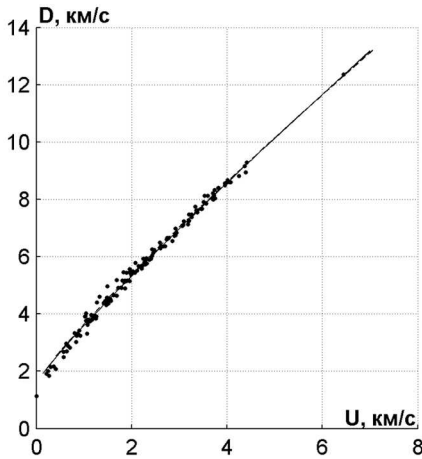


Рис. 1

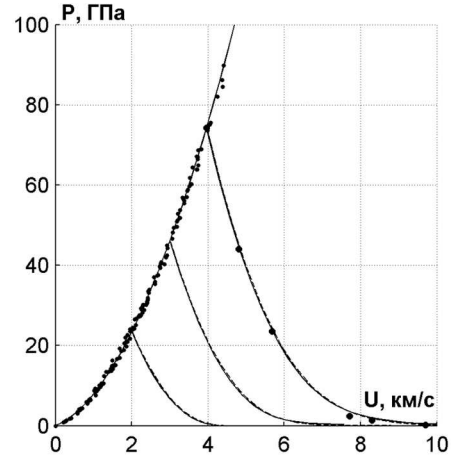


Рис. 2

Одним из наиболее сложных для описания параметров ударного сжатия является температура ударно сжатого вещества. На рис. 3 сплошной линией приведен расчёт по построенному уравнению состояния. В работе [9] проведены модельные оценки температуры за фронтом ударной волны ПТФЭ. Результаты этой оценки показаны штриховой линией на рис. 4. Точкой показаны экспериментальные данные, полученные [7].

На рис. 5 символами приведены экспериментальные данные [8] изобарной теплоемкости при 1 атм. Линиями показаны расчеты изохорной теплоёмкости по построенному уравнению состояния:

сплошная линия – теплоемкость вдоль ударной адиабаты (на вставке в более широком диапазоне температуры); штрих – теплоёмкость при атмосферном давлении; штрих-пунктир – теплоёмкость при $\delta = 1$.

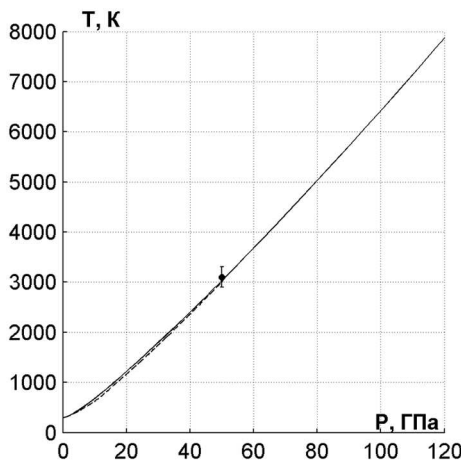


Рис. 3

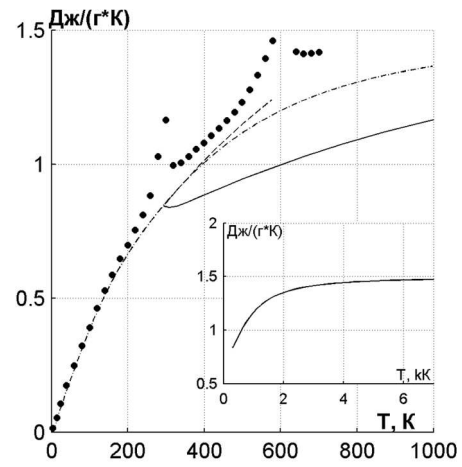


Рис. 4

Как всякий термофлуктуационный процесс, релаксация напряжений будет характеризоваться энергией активации U_i движения какого-либо типа кинетических единиц структуры полимера, а для соответствующего времени τ_i можно использовать формулу Больцмана-Аррениуса:

$$\tau_i = \tau_{0i} \exp(U_i/RT), \tag{4}$$

где τ_{0i} – характерное время релаксационного перехода одной кинетической единицы. Полное время релаксации можно представить в виде суммы слагаемых, соответствующих механизмам релаксации на разных структурных уровнях:

$$\tau = \sum_i \tau_i = \sum_i \tau_{0i} \exp(U_{0i}/RT). \tag{5}$$

При нагружении полимера возникающие напряжения изменяют величину энергии активации, понижая потенциальный барьер релаксационного перехода. Изменение температуры в процессе деформирования приводит к изменению свободного объема полимера. Учёт этих обстоятельств приводит к соотношению:

$$\begin{aligned} \tau(\hat{\sigma}, T) &= \sum_i \tau_{0i} \exp\left(\frac{U_{0i} - \nu_{Ai}(T) \cdot \hat{\sigma}}{RT}\right), \\ \nu_{Ai}(T) &= \nu_{A0i}(1 + \nu_{1i} \Delta T^{n_i}), \quad \Delta T = T - T_0 \\ \hat{\sigma} &= \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}, \end{aligned} \tag{6}$$

где $\hat{\sigma}$ – интенсивность касательных напряжений; ν_{A0i} – эффективный активационный объём в недеформированном состоянии, трактуемый как объём активируемого структурного элемента или кинетической единицы [12]; ν_{1i} и n_i – интерполяционные константы. Для достаточно широкого диапазона напряжений и температур в (6) можно ограничиться четырьмя слагаемыми.

Значения величин энергии активации различных механизмов релаксации определяются косвенными экспериментальными методами (например, [13]). Для конкретизации других параметров зависимости была использована методика, разработанная и апробированная ранее для поликристаллических сред [14]. В её основе лежит решение задачи о деформировании тонкого стержня в рамках сформулированной модели, результатом которого является диаграмма деформирования данного материала. Полученное решение (диаграмма) зависит от искомых интерполяционных параметров в выражении (6) для времени релаксации. Сравнивая расчётные диаграммы или их элементы с экспериментальными (например, минимизируя функционал среднеквадратичных отклонений

характерных величин), можно отыскивать значения входящих в зависимость параметров. Главная из возникающих проблем заключается в малом количестве известных экспериментальных диаграмм полимеров, в том числе и ПТФЭ, полученных при высоких скоростях деформации, соответствующих условиям ударно-волнового нагружения.

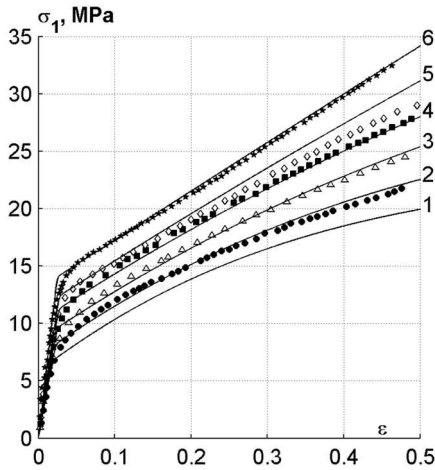


Рис. 5

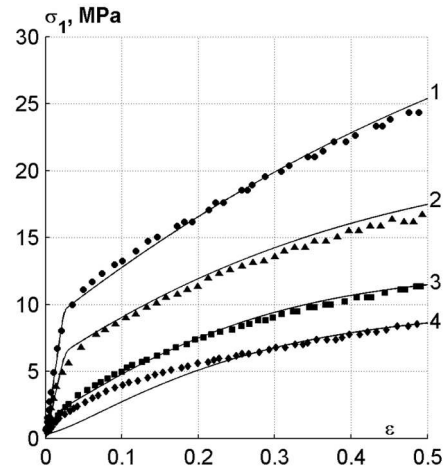


Рис. 6

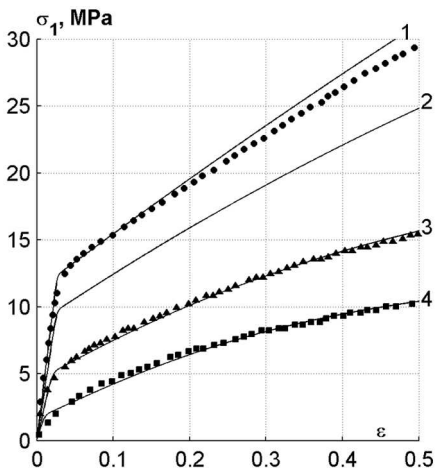


Рис. 7

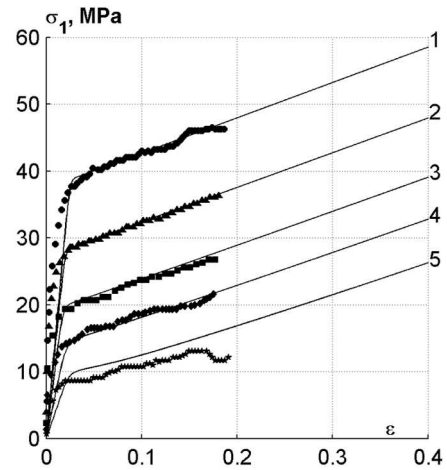


Рис. 8

На рис. 5–8 сплошными линиями приведены результаты расчётов диаграмм сжатия тефлона 7А в сравнении с экспериментальными данными [15].

На рис. 5 начальная температура задавалась равной $T_0 = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, кривые соответствуют следующим скоростям деформации: 1 – 10^{-5} c^{-1} , 2 – 10^{-4} c^{-1} , 3 – 10^{-3} c^{-1} , 4 – 10^{-2} c^{-1} , 5 – 10^{-1} c^{-1} , 6 – 1 c^{-1} .

На рис. 6 все кривые получены при одной и той же скорости деформации 10^{-3} c^{-1} , но при разных начальных температурах: 1 – $26 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $50 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $100 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 7–8 кривые получены при скорости деформации 10^{-1} c^{-1} и $3200 \pm 100 \text{ c}^{-1}$ и начальных температурах: 1 – $26 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $50 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $100 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $150 \text{ }^\circ\text{C}$ и 1 – $15 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $24 \text{ }^\circ\text{C}$, 3 – $50 \text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $100 \text{ }^\circ\text{C}$, 5 – $150 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

В экспериментальных исследованиях ударно-волновых процессов ударная волна в исследуемом образце чаще всего создаётся с помощью удара пластины, разогнанной до высокой скорости. Для проверки применимости построенной модели в расчётах ударно-волновых процессов были решены задачи, воспроизводившие экспериментальные постановки [16; 17; 18] по изучению ударно-волновых процессов в тефлоне.

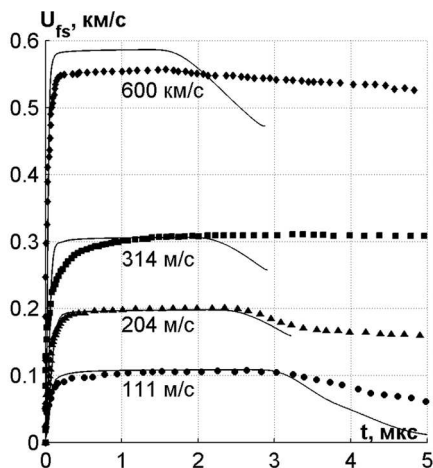


Рис. 9

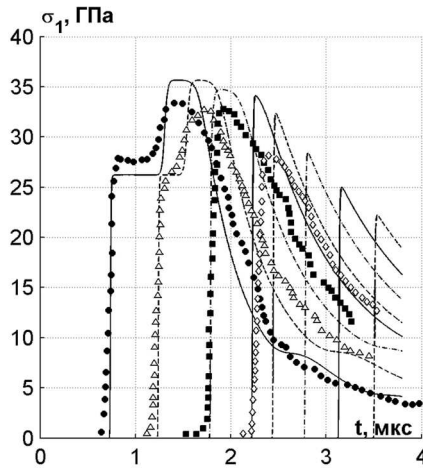


Рис. 10

В первом случае моделировался удар 2.5 мм тефлонового ударника (пластины) по 5 мм тефлоновой мишени. В экспериментах с помощью лазерного интерферометра записывалась зависимость массовой скорости от времени на свободной границе мишени. Экспериментальные профили ударных импульсов четырех различных амплитуд (точки) сравниваются с рассчитанными (сплошные линии) на рис. 9. Скорость ударника также нанесена рядом с соответствующими графиками. По всей видимости, волна разгрузки в экспериментах измерена неточно.

Во втором случае наблюдалось движение импульса сжатия в мишени из фторопласта. Мишень набиралась из отдельных пластин, между которыми находились 4 манганиновых датчика давления. Импульс напряжения генерировался при ударе двухслойной пластины из дюралюминия (4,8 мм) и титана (2 мм) по дюралюминиевому экрану толщиной 4 мм, за которым находилась мишень. Ударник подрывом ВВ разгонялся до скорости 3,5 км/с. После отражения ударной волны (далее УВ), распространявшейся по дюралюминию, от титана возникал импульс, который проходил в экран, а затем в мишень и догонял фронт УВ. На рис. 10 приводится сравнение серии экспериментальных (символы) и расчётных (линии) профилей, зарегистрированных на разных расстояниях от контактной границы экран-мишень.

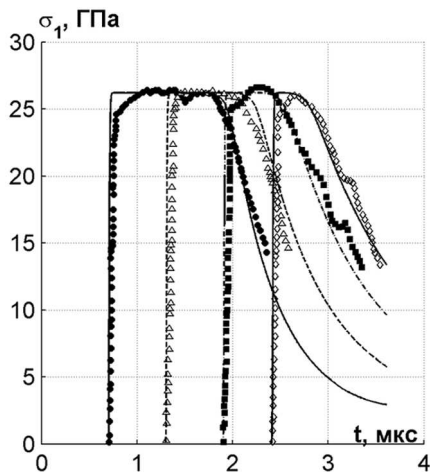


Рис. 11

В третьем случае проводились подобные эксперименты, но ударник состоял из одной дюралюминиевой пластины. На рис. 11 приводится сравнение расчетных (линии) и экспериментальных профилей.

Список литературы

1. Мержиевский Л. А., Воронин М. С. Моделирование ударно-волнового деформирования полиметилметакрилата // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 2. С. 113–123.
2. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д. Численное моделирование ударно-волновых процессов в металлах // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 5. С. 114–122.
3. Годунов С.К. Элементы механики сплошной среды. М.: Наука, 1978.
4. Зельдвич Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1963.
5. Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1968.
6. Глушак Б. Л., Гударенко Л. Ф., Стяжкин Ю. М. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов с переменной теплоемкостью ядер и электронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Мат. моделирование физич. процессов. 1991. Вып. 2. С. 57–62.
7. Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Бордзиловский Д. С. Применение оптического пирометра для измерения температуры ударного сжатия фторопласта // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 1. С. 93–101.
8. Lau S. K., Suzuki H., Wunderlich B. The thermodynamic properties of polytetrafluoroethylene // J. of Polymer Sci.: Polymer Physics Edition. 1984. V. 22. № 5. P. 379–405.
9. Morris C. E., Fritz J. N., McQueen R. G. The equation of state of polytetrafluoroethylene to 80 GPa // J. Chem. Phys. 1984. V. 80. № 10 P. 5203–5218.
10. URL: <http://www.ficp.ac.ru/rusbank/> (дата обращения: 10.03.2013).
11. Бушман А. В. Исследование плексигласа и тефлона в волнах повторного ударного сжатия и изэнтропической разгрузки. Уравнение состояния полимеров при высоких плотностях энергии А. В. Бушман, М. В. Жерноклетов, И. В. Ломоносов, Ю. Н. Сутулов, В. Е. Фортов, К. В. Хищенко // Доклады Академии наук. 1993. Т. 329. № 5. С. 581–584.
12. Козлов Г. В., Сандитов Д. С. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука, 1994.
13. Берштейн В. А., Егоров В. М., Емельянов Ю. А. Взаимосвязь основных релаксационных переходов в полимерах // Высокомолекулярные соединения. 1985. Т. (А) XXVII, № 11 С. 2451–2456.
14. Мержиевский Л. А., Шамонин С. А. Построение зависимости времени релаксации касательных напряжений от параметров состояния среды // ПМТФ. 1980. № 5. С. 170–179.
15. Rae P. J., Dattelbaum D. M. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression // Polymer. 2004. V. 45. P. 7615–7625.
16. Bourne N. K., Gray III G. T. Dynamic response of binders; teflon, estaneTM and Kel-F-800TM // J. App. Phys. 2005. V. 98. P. 123503 (1–9).
17. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Распространение импульса напряжения по ударно-сжатому фторопласту // Физика горения и взрыва. 1992. № 3. С. 118–119.
18. Караханов С. М., Бордзиловский С. А. Динамическое поведение политетрафторэтилена в волнах сжатия и разгрузки // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 5. С. 109–118.

References

1. Merzhiyevsky L. A., Voronin M. S. Modelirovaniye udarno-volnovogo deformirovaniya polimetilmetakrilata // Fizika goreniya i vzryva. 2012. T. 48. № 2. S. 113–123.
2. Merzhiyevsky L. A., Resnyansky A. D. Chislennoye modelirovaniye udarno-volnovykh protsessov v metallakh // Fizika goreniya i vzryva. 1984. T. 20. № 5. S. 114–122.
3. Godunov S.K. Elementy mekhaniki sploshnoy sredy. M.: Nauka, 1978.
4. Zeldvich Ya. B., Rayzer Yu. P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy. M.: Fizmatgiz, 1963.
5. Zharkov V. N., Kalinin V. A. Uravneniya sostoyaniya tverdykh tel pri vysokikh davleniyakh i temperaturakh. M.: Nauka, 1968.
6. Glushak B. L., Gudarenko L. F., Styazhkin Yu. M. Poluempiricheskoye uravneniye sostoyaniya metallov s peremennoy teployemkostyu yader i elektronov // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Mat. Modelirovaniye fizich. protsessov. 1991. Vyp. 2. S. 57–62.
7. Bordzilovsky S. A., Karakhanov S. M., Bordzilovsky D. S. Primeneniye opticheskogo pirometra dlya izmereniya temperatury udarnogo szhatiya ftoroplasta // Fizika goreniya i vzryva. 2010. T. 46, № 1. S. 93–101.
8. Lau S. K., Suzuki H., Wunderlich B. The thermodynamic properties of polytetrafluoroethylene // J. of Polymer Sci.: Polymer Physics Edition. 1984. V. 22. № 5. P. 379–405.
9. Morris C. E., Fritz J. N., McQueen R. G. The equation of state of polytetrafluoroethylene to 80 GPa // J. Chem. Phys. 1984. V. 80. № 10 P. 5203–5218.
10. URL: <http://www.ficp.ac.ru/rusbank/> (data obrashcheniya: 10.03.2013).
11. Bushman A. V. Issledovaniye pleksiglasa i teflona v volnakh povtornogo udarnogo szhatiya i izentropicheskoy razgruzki. Uravneniye sostoyaniya polimerov pri vysokikh plotnostyakh energii /A. V. Bushman, M. V. Zhernokletov, I. V. Lomonosov, Yu. N. Sutulov, V. Ye. Fortov, K. V. Khishchenko // Doklady Akademii nauk. 1993. T. 329. № 5 S. 581–584.
12. Kozlov G. V., Sanditov D. S. Angarmonicheskkiye efekty i fiziko-mekhanicheskkiye svoystva polimerov. Novosibirsk.: Nauka, 1994.
13. Bershteyn V. A., Yegorov V. M., Yemelyanov Yu. A. Vzaimosvyaz osnovnykh relaksatsionnykh perekhodov v polimerakh // Vysokomolekulyarnye soyedineniya. 1985. T. (A) XXVII, № 11 S. 2451–2456.
14. Merzhiyevsky L. A., Shamonin S. A. Postroyeniye zavisimosti vremeni relaksatsii kasatelynykh napryazheniy ot parametrov sostoyaniya sredy // PMTF. 1980. № 5. S. 170–179.
15. Rae P. J., Dattelbaum D. M. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression // Polymer. 2004. V. 45. P. 7615–7625.
16. Bourne N. K., Gray III G. T. Dynamic response of binders; teflon, estane™ and Kel-F-800™ // J. App. Phys. 2005. V. 98. P. 123503 (1–9).
17. Bordzilovsky S. A., Karakhanov S. M. Rasprostraneniye impulsa napryazheniya po udarno-szhatomu ftoroplastu // Fizika goreniya i vzryva. 1992. № 3. S. 118–119.
18. Karakhanov S. M., Bordzilovsky S. A. Dinamicheskoye povedeniye politetraftoretilena v volnakh szhatiya i razgruzki // Fizika goreniya i vzryva. 2000. T. 36. № 5. S. 109–118.

Статья поступила в редакцию 15.03.2013