

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИИМИДНОГО КОМПОЗИТА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

¹Куготова А.М.^{*}, ¹Агноков А.Т., ²Гайтукиева З.Х., ¹Кунижев Б.И.

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

²Ингушский государственный университет

*kam-02@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование процесса разрушения полиимидного композита с различной пористостью при динамическом нагружении. Получены графические зависимости давления в полиимиде с различной степенью пористости от массовой скорости; рассчитаны ударные адиабаты этих же образцов полиимида в координатах D - u . Установлено, что в полиимидном композите в экстремальных условиях протекают необратимые физико-химические превращения вещества на фронте ударной волны.

Ключевые слова: полиимидный композит, динамическое давление, функция Грюнайзена, ударная адиабата

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF DESTRUCTION OF A POLYAMIDE COMPOSITE UNDER DYNAMIC LOADING

¹Kugotova A.M., ¹Agnokov A.T., ²Gaitukieva Z.Kh., ¹Kunizhev B.I.

¹Kabardino-Balkarian State University

²Ingush State University

Abstract. The process of destruction of a polyamide composite with different porosities under dynamic loading has been studied. Graphical dependences of pressure in polyimide with varying degrees of porosity on mass velocity are obtained; impact adiabat of the same polyimide samples in D - u coordinates are calculated. It has been established that irreversible physico-chemical transformations of matter at the shock wave front occur in the polymer composite under extreme conditions.

Keywords: polyamide composite, dynamic pressure, Gruneisen function, impact adiabatic

Изучение различных термодинамических параметров веществ при динамическом сжатии сплошных образцов позволяет определить свойства материала вблизи ударной адиабаты. Использование в этих экспериментах образцов с различной пористостью расширяют область диаграмм состояния для исследований [1–5].

Построение диаграмм состояния полимеров при высоких давлениях и температурах необходимо для решения практических задач физики и техники высоких плотностей энергии. Однако количество работ, посвященных этой проблеме, крайне мало, хотя полимерные композиты обладают уникальными свойствами и представляют собой перспективные материалы, которые найдут широкое применение в полимерных конструкциях, несущих высокие тепловые и силовые нагрузки [1–5]. Вышеизложенное стимулировало проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов разрушения полимерных композитов при динамическом нагружении, и на их основе построить ударные адиабаты сплошных и пористых образцов полиимидного композита.

В данной работе в качестве объекта исследования использован полиимидный композит, который широко используется при производстве аэрокосмической техники. Известно, что полиимид является представителем сложных высокомолекулярных веществ, его химическая формула достаточно сложна и вызывает большие трудности при расчете термодинамических свойств методами квантовой статистики. В связи с этим для построения диаграмм состояний и ударных адиабат полиимидного композита в экстремальных условиях использованы уравнения состояния полиимида, полученные в рамках полумпирической модели, в которых вид функциональных зависимостей термодинамического потенциала устанавливается с привлечением современных теоретических представлений. Процессы разрушения сплошных и пористых образцов полиимидного композита исследовались на электродинамическом ускорителе при различных скоростях воздействия ударника из полиэтилена [2]. Впоследствии эти экспериментальные результаты использовались для расчета численных коэффициентов в уравнениях состояний.

Описание состояния сплошных и пористых образцов из полиимидного композита проводилось с использованием термодинамически равновесной модели, где учитывается наличие газа в парах, являющегося одним из компонентов среды. При описании конденсированных фаз используется уравнение состояния Ми-Грюнайзена с учетом зависимости функции Грюнайзена от температуры. Описываемая модель позволяет в предположении одинакового давления для всех фаз рассчитать состояние композита из полиимидного композита с различной пористостью при динамическом нагружении для давлений не выше 5 ГПа. Также проведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными результатами разных авторов.

Проведенные исследования состояния пористых композитных материалов при динамическом нагружении представляют интерес для многих задач современной науки, что вызывает появление в последнее время новых моделей для описания поведения смесей веществ, например [1, 2].

Несмотря на большое число подходов к выбору уравнения состояния (УС) твердого тела при динамических нагрузках [3–10], проблема расчета УС в ее точной математической постановке практически неразрешима, так как исходные уравнения (из статистической термодинамики) чрезвычайно сложны.

С учетом вышеизложенного выписываются уравнения, определяющие состояние конденсированного компонента

$$P(\rho, T) = P_x(\rho) + P_T(\rho, T) \text{ и } E(\rho, T) = E_x(\rho) + E_T(T), P_T(\rho, T) = \Gamma \rho E_T(T),$$

в предположении

$$E_T(T) = c_v(T - T_0).$$

В этих уравнениях P_x, E_x, P_T, E_T – соответственно потенциальные и тепловые составляющие давления и удельной энергии; c_v – удельная теплоемкость; T_0 – начальная температура; Γ – коэффициент Грюнайзена.

В работе холодная составляющая давления P_x предложена в виде уравнения Тэта. Тогда термические и калорические формы УС для конденсированного компонента с текущей и начальной плотностями ρ, ρ_0 имеют вид

$$P(\rho, T) = A \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right) + \Gamma c_v (T - T_0) \rho, \quad (1)$$

$$E(\rho, T) = \frac{A}{\rho_0} \left(\frac{1}{n-1} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{n-1} + \frac{\rho_0}{\rho} - \frac{n}{n-1} \right) + c_v (T - T_0).$$

Выбор этих уравнений обусловлен их простотой [11], поскольку для каждого вещества, помимо функции Грюнайзена, используются величины предельного сжатия $h = 1 + 2/\Gamma$, содержащее две подгоночные константы A и n , которые при наличии данных можно связать с помощью скорости звука в нормальных условиях c_0 : $A = \rho_0 c_0^2 / n$. Для газа берется УС идеального газа,

$$P = (\gamma - 1) \rho_g c_g (T - T_0),$$

где ρ_g – плотность газа, а постоянные $\gamma = 1,41$ – показатель адиабаты и $c_g = 718 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – теплоемкость газа соответствуют воздуху аналогично [2]. Затем выписываются условия динамической

совместности на фронте волны: условия сохранения потока массы для каждого компонента композита и сохранения потоков импульса и энергии для вещества в целом [10]. Использование полученных уравнений в совокупности с УС каждого компонента достаточно для нахождения зависимостей типа $P(U)$ или $D(U)$ (P , U , D – давление, массовая и волновая скорости соответственно), которые можно трактовать как ударную адиабату (УА) пористого полиимидного композита.

С учетом того, что по первоначально покоящейся среде распространяется ударная волна со скоростью D , запишем уравнения динамической совместности на фронте ударной волны для композита с двумя конденсированными компонентами:

$$\rho_{10}\mu_{10}D = \rho_{11}\mu_{11}(D-U), \quad (2)$$

$$\rho_{20}\mu_{20}D = \rho_{21}\mu_{21}(D-U), \quad (3)$$

$$\rho_{g0}(1-\mu_{10}-\mu_{20})D = \rho_{g1}(1-\mu_{11}-\mu_{21})(D-U), \quad (4)$$

$$P_0 + \rho_{10}\mu_{10}D^2 + \rho_{20}\mu_{20}D^2 + \rho_{g0}(1-\mu_{10}-\mu_{20})D^2 = P + \rho_{11}\mu_{11}(D-U)^2 + \rho_{21}\mu_{21}(D-U)^2 + \rho_{g1}(1-\mu_{11}-\mu_{21})(D-U)^2, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_0D + \frac{1}{2}\rho_{10}\mu_{10}D^3 + \frac{1}{2}\rho_{20}\mu_{20}D^3 + \frac{1}{2}\rho_{g0}(1-\mu_{10}-\mu_{20})D^3 = P(D-U) + \\ + \frac{1}{2}\rho_{11}\mu_{11}(D-U)^3 + \frac{1}{2}\rho_{21}\mu_{21}(D-U)^3 + \\ + \frac{1}{2}\rho_{g1}(1-\mu_{11}-\mu_{21})(D-U)^3 + \rho_{11}\varepsilon_1(D-U)\mu_{11} + \\ + \varepsilon_2\rho_{21}\mu_{21}(D-U) + \rho_{g1}(1-\mu_{11}-\mu_{21})(D-U)\varepsilon_g. \end{aligned} \quad (6)$$

В этих уравнениях ε_i – удельная внутренняя энергия для каждой из конденсированных фаз; ε_g – удельная внутренняя энергия газа; $\rho_{i0}, \rho_{i1}, \mu_{i0}, \mu_{i1}$ – плотность и объемная доля i -й фазы вещества перед фронтом ударной волны и за ним ($i=1, 2, g$), $\rho_{g0} = 1,293 \text{ кг/м}^3$; C_{vi} – удельная теплоемкость для каждой из конденсированных фаз (полагается постоянной); A_i, n_i, Γ_i – коэффициенты в уравнениях состояния каждого из конденсированных компонентов ($i = 1, 2$); начальная внутренняя энергия компонентов равна нулю.

Уравнения (2)–(4) – условия сохранения потока массы для каждой из конденсированных фаз и газа в предположении отсутствия обмена массой между компонентами, (5) – уравнение сохранения потока импульса композита, (6) – уравнение сохранения потока энергии композита. Из (2)–(6) для композита с двумя конденсированными компонентами можно получить следующее выражение (предполагается, что $P_0 = 0$):

$$\begin{aligned} P = \frac{Z_1 + Z_2 \frac{\mu_{20}\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_2}}{h_1 + \frac{\mu_{20}\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_2}h_2 + \frac{(1-\mu_{10}-\mu_{20})\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_g}h_g - \frac{\sigma_1}{\mu_{10}}}, \quad (7) \\ Z_i = A_i \left[\left(h_i - \frac{n_i + 1}{n_i - 1} \right) \sigma_i^{n_i} + \frac{2n_i\sigma_i}{n_i - 1} - h_i - 1 \right], \\ h_i = \frac{2}{\Gamma_i} + 1, i = 1, h_g = \frac{2}{\gamma - 1} + 1, \end{aligned}$$

где $\sigma_i = \rho_i / \rho_{i0}$ – степени сжатия соответствующего компонента, $i = 1, 2, g$. Добавляя к (7) два соотношения, которые следуют из уравнений состояния трех компонентов композита и выражают равенство температур всех компонентов, имеем в итоге три уравнения для четырех неизвестных $P, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_g$, позволяющие построить УА смеси. Для вывода уравнений динамической совместности пористого полиимидного композита достаточно положить, что $\mu_{20} = \mu_{21} = 0$, тогда пористое вещество будет описываться как смесь с одним конденсированным компонентом. Для расчета поведения сплошного материала полагаем $\mu_{10} = 1$, тогда (7) преобразуется к следующему виду:

$$P = \frac{A_1}{h_1 - \sigma_1} \left[\left(h_1 - \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1} \right) \sigma_1^{n_1} + \frac{2n_1 \sigma_1}{n_1 - 1} - h_1 - 1 \right]. \quad (8)$$

В итоге получаем известное уравнение ударной адиабаты [9], которое использовалось в предположении $\Gamma = const$ и успешно описывало экспериментальные данные при сравнительно невысоких давлениях и температурах.

Плотность сплошных образцов исследуемого полиимида $\rho = 1,41 \cdot 10^3$ кг/м³, пористых с коэффициентами пористости $\Pi_1 = 0,52$ и $\Pi_2 = 0,76$.

В основе проведенного анализа экспериментальных данных как сплошных, так и пористых композитов предложена эмпирическая зависимость функции Грюнайзена от температуры в следующем виде:

$$\Gamma(T) = \frac{1}{\frac{1}{\Gamma(T_0) - \Gamma_\infty} + C(T - T_0)} + \Gamma_\infty. \quad (9)$$

Здесь параметры выбираются из условия соответствия расчетных ударных адиабат известным экспериментальным результатам для каждого материала.

На *рис. 1* представлены зависимости динамического давления P полиимидного композита с различной степенью пористости от массовой скорости u , а на *рис. 2* – ударные адиабаты этих же образцов полиимидного композита в координатах $D-u$ (скорость ударной волны – массовая скорость вещества за фронтом ударной волны).

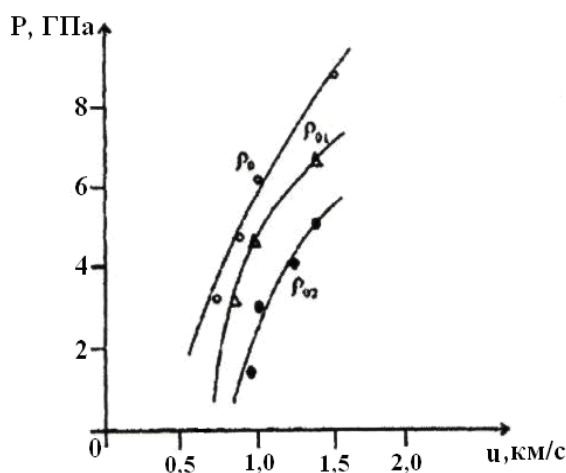


Рис. 1. Зависимости динамического давления P от скорости ударника V_0 полиимидного композита с различной пористостью: 1 – сплошной; 2 – $\Pi = 0,52$; 3 – $\Pi = 0,76$.

Сплошные линии – результаты расчета по уравнению (8), точки – экспериментальные данные

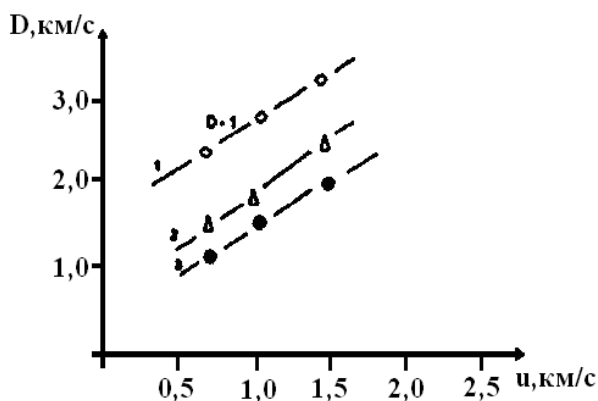


Рис. 2. Ударные адиабаты полиимидного композита с различной пористостью: 1 – сплошной; 2 – $\Pi = 0,52$; 3 – $\Pi = 0,76$

Описание совокупности данных, представленных на рис. 1 и 2 и содержащихся в [9] и компендиуме [11], позволяют сделать вывод о том, что в полиимидном композите в таких экстремальных условиях происходят необратимые физико-химические превращения вещества на фронте ударной волны. Как видно, на ударной адиабате сплошного вещества превращение начинается в области давлений 4,5 ГПа и происходит с существенным изменением плотности и сжимаемости среды. На ударных адиабатах пористых образцов полиимидного композита из-за действия высоких температур эффекты физико-химического превращения постепенно сглаживаются. Приведенные процессы в полиимидном композите в условиях действия экстремальных давлений и температур связываются с химической деструкцией полимера, вызванной распадом С–Н и С–О связей, что приводит к образованию малосжимаемой алмазоподобной фазы высокого давления углерода и соответствующего большого количества молекулярного водорода, а также других низкомолекулярных компонентов [10].

Библиография

1. Бушман А.В., Фортов В.Е. Модели уравнений состояний веществ // УФН. 1983. Т. 140, № 2. С. 741–760.
2. Кунижев Б.И., Фортов В.Е., Костин В.В., Красюк И.К., Темроков А.И. Исследование ударно-волновых и деструкционных процессов при высокоскоростном ударе и лазерном воздействии на мишень из органического стекла // ТВТ. 1997. Т. 35, № 6. С. 962–967.
3. Хищенко К.В., Ломоносов И.В., Фортов В.Е. Термодинамические свойства пластиков в широком диапазоне плотностей и температур // Доклады Академии наук. 1996. Т. 349, № 3. С. 322–325.
4. Цечоева А.Х., Куготова А.М., Кунижев Б.И., Таова Э.Ю., Унакафов И.М., Ахриев А.С., Мартганова Л.М. Функция Грюнайзена некоторых полимеров и композиций // Глобальный научный потенциал. 2013. Т. 23, № 2. С. 27–31.
5. Кунижев Б.И., Костин В.В., Темроков А.И., Сучков А.С. Динамическое разрушение полиметилметакрилата (ПММА) при ударе // ЖТФ. 1995. Т. 65, № 7. С. 176–179.
6. Ree F.H. Systematics of high-pressure and high-temperature behavior of hydrocarbons // J. Chem. Phys. 1979. V. 70. P. 974–983.
7. March S.P. LASL shock Hugoniot data. Univ. California Press. Berkeley, 1980. 658 p.
8. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы. Metallurgia. 1987. 238 с.
9. Куготова А.М. Высокоскоростное нагружение и разрушение полиметилметакрилата: дисс... канд. физ.-мат. наук. Нальчик. 2009. 133 с.
10. Молодец А.М. Температурная зависимость функции Грюнайзена химических элементов // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 5. С. 122–127.
11. Гударенко Л.Ф., Гущина О.Н., Жерноклетов М.В., Медведев А.Б., Симаков Г.В. Ударное сжатие и изоэнтропическое расширение пористых образцов вольфрама, никеля и олова // ТВТ. 2000. Т. 38. С. 437–444.