

**ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОВОЙ ДИССИПАЦИИ
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
В ДВУХФАЗНОМ ПОРИСТОМ МАТЕРИАЛЕ**

Исследованы эффекты мезоскопического процесса тепловой диссипации в ударно-сжатом пористом материале, содержащем сферические поры с тонким слоем пластификатора на их поверхности. Установлены специфические особенности кумуляции энергии ударного сжатия в изучаемой системе.

E-mail: e.pilyavskaya@mail.ru

Ключевые слова: двухфазный пористый материал, ударно-волновое нагружение, эффекты тепловой диссипации.

При распространении по пористому материалу ударной волны (УВ) в нем могут происходить физико-химические превращения, в общем случае неравновесные. При сильном ударном сжатии, когда прочностью матричной фазы пористого материала можно пренебречь, его реологические свойства описываются следующей математической моделью [1]. Ударная волна представляется в виде поверхности разрыва, что позволяет пренебречь деталями процесса уплотнения в ударно-сжатом пористом материале, поскольку часть удельной внутренней энергии, затрачиваемой на сжатие пор, пренебрежимо мала относительно суммарного приращения удельной (на единицу массы) внутренней энергии при ударном переходе [1]

$$E_e - E_0 = \frac{p_e - p_0}{2\rho_0} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_e} \right), \quad (1)$$

где p — давление; ρ — плотность; E — удельная внутренняя энергия; индексы 0 и e относятся к состояниям материала перед и позади фронта УВ.

При слабых УВ с интенсивностью, достаточной для проявления поверхностно-прочностных эффектов (прочности окрестности индивидуальных пор [2]), мезоскопические (в масштабе поры) процессы тепловой диссипации становятся определяющими [2–11]. Характерным является то, что при распространении слабой УВ помимо средне-поступательного движения существенными становятся пульсационно-радиальные движения в окрестности пор. Их учет при построении математической модели изучаемого материала приводит к появлению дополнительного мезоскопического масштаба — радиуса поры, характеризующего эту внутреннюю степень свободы. Отметим, что при рассмотрении ударно-сжатого пористого материала как термодинамической системы с внутренней степенью свободы необходимо и в ар-

гументах удельной внутренней энергии учитывать дополнительные источники тепловой диссипации мезоскопического масштаба.

Несмотря на значительное число работ по рассматриваемой проблеме, актуальным остается вопрос о кумуляции энергии ударного сжатия в вязкопластическом материале, содержащем сферические поры с тонким слоем пластификатора на их поверхности. Его изучению и посвящены проводимые в настоящей работе исследования.

Рассмотрим задачу о стационарной УВ, распространяющейся со скоростью D в двухфазном пористом материале — вязкопластической пористой среде (фаза 1), содержащей сферические поры радиуса a (регулярная ячеистая схема [3]; наличием газа в порах пренебрегается) с покрытием их поверхности (фаза 2; вязкая среда). Зависимости между среднеинтегральными и фазовыми значениями величин в этом случае определяются формулами [8, 10]

$$\begin{aligned} p &= \alpha^{-1} [\delta p_2 + (1 - \delta)p_1]; \\ \rho &= \alpha^{-1} \rho_s = \alpha^{-1} [\delta \rho_2 + (1 - \delta)\rho_1]; \\ \alpha &= \frac{b^3}{b^3 - a^3}, \quad \delta = \frac{c^3 - a^3}{b^3 - a^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где b — радиус сферического объема характерного (представительного) элемента двухфазного материала; c — радиус контактной границы фаз; α , δ — концентрационные симплексы подобия изучаемого материала.

Далее будем предполагать, что характерная длина УВ много больше размера пор и расстояния между ними, плотности фаз 1 и 2 двухфазного пористого материала постоянны, объемным содержанием фазы 2 в единице объема двухфазного пористого материала можно пренебречь, реализуется сильновязкий режим [7–11] затекания пор с сохранением их сферической формы, при этом процесс теплопереноса не оказывает существенного влияния на формируемое температурное поле в ударно-сжатом пористом материале.

При сделанных предположениях интегральные законы сохранения массы и импульса на фронте УВ можно записать как [8, 10]

$$p_e - p_0 = \rho_1 D^2 (\alpha_0 - \alpha_e) \alpha_0^{-2}, \quad (3)$$

где

$$p_0 = \frac{2Y}{3} \ln \frac{\alpha_0}{\delta + \alpha_0 - 1} \quad (4)$$

— амплитуда упругого предвестника, а скорость деформации $\dot{\alpha}$ двухфазного пористого материала внутри ударного фронта можно представить в виде [8]

$$\dot{\alpha}(\alpha) = -\frac{3\alpha(\alpha - 1)(\delta + \alpha - 1)}{4[\mu\alpha\delta + \eta(\alpha - 1)(1 - \delta)]} \times \\ \times \rho_1 D^2 \left[\frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0^2} + \frac{2Y}{3\rho_1 D^2} \ln \frac{\alpha_0(\delta + \alpha - 1)}{\alpha(\delta + \alpha_0 - 1)} \right]. \quad (5)$$

Здесь Y — предел текучести вязкопластического материала (фаза 1); η, μ — коэффициенты вязкости фаз 1 и 2 соответственно.

Отметим, что реализация сильновязкого режима затекания пор в ударно-сжатом материале приводит к существованию волны с монотонным профилем [4, 6, 7].

Для удобства дальнейших рассуждений, связанных с анализом особенностей кумуляции энергии ударного сжатия в двухфазном пористом материале, введем лагранжеву систему координат (r_0, t) . При этом связь между лагранжевой r_0 и эйлеровой r координатами сферического объема характерного элемента двухфазного материала определяется как

$$r^3 = r_0^3 - a_0^3 (\alpha - \alpha_0) (\alpha_0 - 1)^{-1},$$

а скорость изменения диссипированной (на единицу объема) энергии ударно-сжатого материала можно представить в виде

$$\dot{e}(r_0, t) = \dot{e}^{(1)}(r_0, t) + \dot{e}^{(2)}(r_0, t), \quad (6)$$

где

$$\dot{e}^{(1)}(r_0, t) = -\frac{2Y a_0^3 \dot{\alpha}}{3[r_0^3(\alpha_0 - 1) - a_0^3(\alpha_0 - \alpha)]^2} + \\ + \frac{4a_0^3 \eta \dot{\alpha}^2}{3[r_0^3(\alpha_0 - 1) - a_0^3(\alpha_0 - \alpha)]^2} \quad c_0 < r_0 < b_0, t > 0;$$

— скорость изменения диссипированной энергии вследствие пластических деформаций материала и работы вязких сил фазы 1;

$$\dot{e}^{(2)}(r_0, t) = \frac{4a_0^3 \mu \dot{\alpha}^2}{3[r_0^3(\alpha_0 - 1) - a_0^3(\alpha_0 - \alpha)]^2}, \quad a_0 < r_0 < c_0, t > 0.$$

— скорость изменения диссипированной энергии вследствие работы вязких сил фазы 2.

Скорость изменения среднеинтегральных значений величин определяется осреднением соответствующих распределений скоростей изменения диссипированной энергии (6) в пределах фаз рассматриваемого (представительного) сферического объема:

$$\dot{e} = \dot{e}_Y + \dot{e}_V, \quad (7)$$

где

$$\dot{e}_Y = \frac{2Y}{3} \dot{\alpha} \ln \frac{\delta + \alpha - 1}{\alpha}; \\ \dot{e}_V = \frac{4\dot{\alpha}^2}{3\alpha(\alpha - 1)(\delta + \alpha - 1)} [\mu\alpha\delta + \eta(\alpha - 1)(1 - \delta)].$$

Приращение диссипированной энергии единицы объема ударно-сжатого материала в рассматриваемом (сильновязком) режиме затекания пор определяется из (7) с учетом равенства (5) в виде

$$e = e_Y + e_V,$$

где

$$e_Y = \frac{2Y}{3} \left[\alpha \ln \frac{\delta + \alpha - 1}{\alpha} - \alpha_0 \ln \frac{\delta + \alpha_0 - 1}{\alpha_0} + (\delta - 1) \ln \frac{\delta + \alpha - 1}{\delta + \alpha_0 - 1} \right]; \quad (8)$$

$$e_V = \frac{\rho_s D^2}{2\alpha_0^2} (\alpha_0 - \alpha)^2 + \frac{2Y}{3} \left[\alpha \ln \frac{\alpha(\delta + \alpha_0 - 1)}{\alpha_0(\delta + \alpha - 1)} - (\delta - 1) \ln \frac{\delta + \alpha - 1}{\delta + \alpha_0 - 1} \right].$$

В конечном состоянии ($\dot{\alpha} = 0$) за фронтом УВ значение параметра пористости

$$\alpha_e = (1 - \delta) \left[1 - \exp \left(-\frac{3p_e}{2Y} \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

а приращение удельной диссипированной энергии можно представить в виде

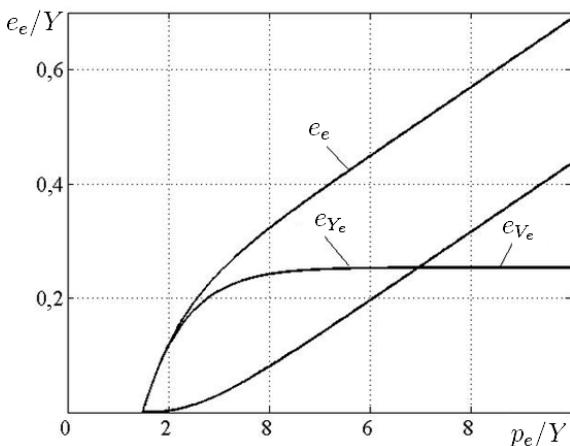
$$e_e = e_{Ye} + e_{Ve}, \quad (10)$$

где приращение диссипированной энергии e_{Ye} единицы объема двухфазного материала вследствие пластических деформаций (фаза 1) определяется равенством (8) при $\alpha = \alpha_e$, а приращение удельной диссипированной энергии e_{Ve} вследствие работы вязких сил (фазы 1, 2) с учетом равенств (3)–(5) определяется как

$$e_{Ve} = \frac{2Y}{3} \left[\frac{\alpha_0 - \alpha_e}{2} \ln \frac{\alpha_e(\delta + \alpha_0 - 1)}{\alpha_0(\delta + \alpha_e - 1)} + \alpha_e \ln \frac{\alpha_e(\delta + \alpha_0 - 1)}{\alpha_0(\delta + \alpha_e - 1)} + (\delta - 1) \ln \frac{\delta + \alpha_e - 1}{\delta + \alpha_0 - 1} \right]. \quad (11)$$

На рисунке представлены результаты расчетов, отражающие наиболее специфические особенности кумуляции энергии в двухфазном пористом материале при низкоамплитудных динамических воздействиях. Расчет проведен при $\alpha_0 = 1,11$ (пористость $\phi_0 = 0,1$) и $\delta = 0,01$. Видно, что при $p_e \sim Y$ основной вклад в мезоскопический процесс тепловой диссипации вносит пластичность фазы 1 ударно-сжатого материала, а при $p_e \gg Y$ — вязкие свойства его фаз.

Легко убедиться в том, что суммарное приращение e_e удельной диссипированной энергии при ударном переходе (10) в анализируемом (сильновязком) режиме затекания пор определяется соотношением (1), обычно называемым ударной адиабатой или адиабатой Гюгонио [1], если учесть очевидное равенство $E_e = e_e \rho_s^{-1}$, зависимости



Графики зависимостей суммарного приращения удельной диссипированной энергии e_e в ударно-сжатом пористом материале и ее составляющих, обусловленных пластическими деформациями материала e_{γ_e} и работой вязких сил e_{ν_e} , от амплитуды ударной волны

(2), устанавливающие связь между среднеинтегральными и фазовыми значениями величин двухфазного пористого материала, и равенства (4), (9).

Важно отметить, что при проявлении инерционных эффектов в процессе затекания пор соотношение (1) не выполняется, поскольку в этом случае возрастает роль составляющей, определяющей вклад кинетической энергии мезомасштабных движений в удельную (на единицу объема) внутреннюю энергию ударно-сжатого пористого материала [11]:

$$e_K = \frac{a_0^2 \dot{\alpha}^2}{6(\alpha_0 - 1)^{2/3}} \left\{ \frac{\rho_2}{(\alpha - 1)^{1/3}} + \frac{\rho_1 - \rho_2}{(\delta + \alpha - 1)^{1/3}} - \frac{\rho_1}{\alpha^{1/3}} \right\}.$$

К аналогичному эффекту могут также приводить как мезоскопические процессы теплового разупрочнения материалов фаз [5, 7], так и эффекты локального плавления в окрестности затекаемых пор [6, 9].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант НШ-4046.2010.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З е л ь д о в и ч Я. Б., Р а й з е р Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
2. Н и к о л а е в с к и й В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984. – 232 с.
3. Н и г м а т у л и н Р. И. Динамика многофазных сред / В 2 ч. – М.: Наука, 1987.
4. У д а р н о-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С.П. Киселев, Г.А. Руев, А.П. Трунев и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. – 1992. – 261 с.

5. Нестеренко В. Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. – 200 с.
6. Дунин С. З., Сурков В. В. Эффекты диссипации энергии и влияние плавления на ударное сжатие пористых тел // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1982. – № 1. – С. 131–142.
7. Хасанов Б. А., Аттетков А. В., Борисов А. А. Ударно-волновое инициирование пористых энергетических материалов и вязкопластическая модель горячих точек // Химическая физика. – 1996. – Т. 15, № 7. – С. 53–125.
8. Attetkov A. V., Golovina E. V., Ermolaev B. S. Mathematical simulation of mesoscopic processes of heat dissipation and heat transfer in a two-phase porous material subjected to shock compression // Journal of Heat Transfer Research. – 2008. – V. 39, no. 6. – P. 479–487.
9. Аттетков А. В., Головина Е. В., Ермолаев Б. С. Математическое моделирование мезоскопических процессов тепловой диссипации и теплопереноса при наличии расплавленных зон в ударно-сжатом пористом материале // Тепловые процессы в технике. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 129–132.
10. Аттетков А. В., Головина Е. В., Ермолаев Б. С. Иерархия моделей процесса теплопереноса в двухфазном пористом материале при ударном сжатии // Труды V Российской конференции по теплообмену. – М., 2010. – Т. 8. – С. 50–53.
11. Аттетков А. В., Пилывская Е. В. Эффекты тепловой диссипации при ударном сжатии двухфазного пористого материала // Необратимые процессы в природе и технике: Труды VI Всероссийской конференции. – М., 2011. – Ч. II. – С. 22–25.

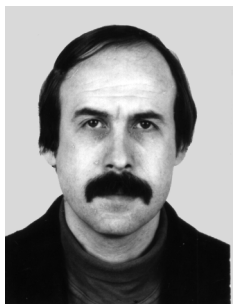
Статья поступила в редакцию 7.06.2011



Елена Владимировна Пилывская, окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г. Аспирантка кафедры “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области математического моделирования ударно-волновых процессов в многофазных средах. Награждена медалью “За лучшую научную студенческую работу” по итогам открытого конкурса на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам в вузах РФ.

E.V. Pilyavskaya graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2009. Post-graduate of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University.

Author of 10 publications in the field of mathematical simulation of shock-wave processes in multiphase materials.



Александр Владимирович Аттетков родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры “Прикладная математика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. Автор более 100 научных работ в области физики горения и взрыва, химической физики и математического моделирования.

A.V. Attetkov (b.1955) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1979. Ph. D. (Eng.), senior researcher, assoc. professor of “Applied Mathematics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100

publications in the field of physics of combustion and explosion, chemical physics and mathematical simulation.