

А. В. Аттетков, М. М. Бойко, Н. А. Волдаев,
А. В. Левантовский, В. С. Соловьев, В. М. Тебякин

РЕОЛОГИЯ ВОЛНОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОРОШКООБРАЗНОГО ОКТАНИТА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Исследована реология волновой деформации порошкообразного термостойкого ВВ — октанита при низкоамплитудных динамических воздействиях. Изучены закономерности эволюции волнового профиля в порошкообразном октаните, определены характеристики динамической сжимаемости и пороговые условия инициирования химической реакции в исследуемом термостойком ВВ.

Исследования реологии волновой деформации порошкообразных ВВ при низкоамплитудных динамических воздействиях занимают важное место в проблемах ударно-волновой чувствительности энергетических материалов [1], перехода горения в детонацию [2]. Изучение закономерностей гомогенизации гетерогенного вещества в данном диапазоне нагрузок позволяет не только установить физические особенности процесса динамического сжатия, но и определить механизмы неупругого деформирования исследуемого энергетического материала, ассоциируя последние с механизмами тепловой диссипации ВВ при динамическом нагружении.

Отличительная особенность поведения порошкообразного вещества в рассматриваемом диапазоне нагрузок — нелинейность кривой динамической сжимаемости в D, u -плоскости, что связано с влиянием структурной неоднородности исходного состояния вещества на реологию его волновой деформации [3]. Определяющими при этом являются как прочностные характеристики, так и морфология исходных фракций порошкообразного вещества.

Результаты исследований по низкоамплитудным динамическим воздействиям на энергетические материалы малочисленны и относятся в основном к высокоплотным ВВ. Можно выделить работу [4], в которой представлены результаты определения пороговых давлений инициирования химической реакции в тетриле и октогене при воздействии ступенчатых импульсов давления большой длительности.

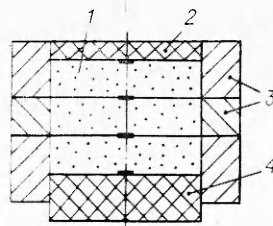
В настоящей работе изучалась реология волновой деформации порошкообразных ВВ при низкоамплитудных динамических воздействиях. В качестве объекта исследований выбрано порошкообразное термостойкое ВВ — мелкодисперсный октанит с начальной плотностью $\rho_0 = 0,99 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ($m_0 = 1 - \rho_0/\rho_s = 0,45$, $\rho_s = 1,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ — плотность октанита в монолитном состоянии). Изучены закономерности динамического поведения порошкообразного ВВ, определены характеристики его динамической сжимаемости.

Методика экспериментов

Генерация плоских ударных волн (УВ) в веществе осуществлялась ударом массивного диска из текстолита диаметром $d = 50,1$ и толщиной $\Delta = 25$ мм, метаемого с помощью взрывного ствольного устройства [3]. Давление динамического воздействия варьировалось изменением начальной скорости ударника v_0 , что достигалось изменением массы низкоплотного взрывчатого состава — механической смеси гексогена с мипорой, используемого для разгона ударника. Скорость ударника определялась на фиксированной базе по замыканию электроконтактных датчиков. Разработанное устройство взрывного метания позволяет реализовывать низ-

Рис. 1. Схема экспериментальной сборки.

1 — исследуемое порошкообразное ВВ; 2 — преграда; 3 — противоразгрузочное устройство; 4 — экран.



коамплитудные динамические нагрузки прямоугольного профиля регулируемой длительности воздействия в диапазоне $v_0 = 50 \div 500$ м/с.

Конструкция экспериментальной сборки (рис. 1) состоит из текстолитового экрана толщиной $\Delta_{\text{э}} = 11,5$ мм, преграды из текстолита $\Delta_{\text{пр}} = 5$ мм и противоразгрузочного устройства. Измерения эволюции волнового профиля в образцах порошкообразного октанита ($d_{\text{ок}} = 40$ мм, $\Delta_{\text{ок}} = 30$ мм) проводились электромагнитными плоскими алюминиевыми датчиками массовой скорости, $\Delta_{\text{д}} = 150$ мкм. Непосредственно по результатам измерений определялись волновая D и массовая u скорости, по значениям которых рассчитывались давление динамического сжатия $p = \rho_0 u D$ и степень сжатия $\rho_0/\rho = 1 - u/D$.

Кривая динамической сжимаемости исследуемого ВВ строилась по результатам обработки осциллограмм, регистрируемых двумя первыми электромагнитными датчиками, один из которых размещен на границе ВВ и инертного экрана, а другой — на расстоянии 10 мм от плоскости нагружения порошкообразного октанита. Подчеркнем, что используемая конструкция сборки позволяет проследить за динамикой изменения волнового профиля, но затрудняет построение адиабаты двукратного сжатия исследуемого вещества вследствие определяющего влияния реальной микроструктуры порошкообразного ВВ на реологию его волновой деформации в изучаемом диапазоне давлений динамического воздействия, а также возможного затухания УВ на толщине слоя образца.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений эволюции профиля массовой скорости $u(t)$ при различных скоростях ударника представлены на рис. 2. Анализ волновых структур не указывает на ряд специфических особенностей. С увеличением v_0 амплитуда волны возрастает, при этом ширина фронта волны уменьшается. При $v_0 \leq 500$ м/с волна интенсивно затухает при распространении в глубь образца, при этом каких-либо отличительных особенностей в структуре волнового профиля, связанных с «очаговым»

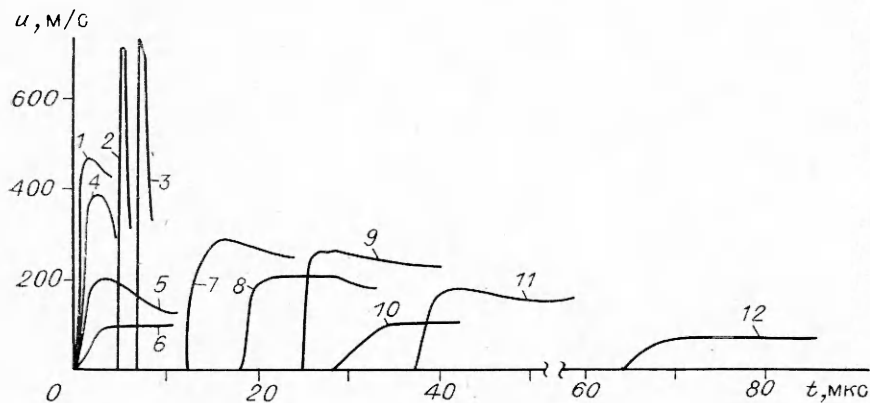


Рис. 2. Эволюция волнового профиля при различных начальных скоростях ударника.

v_0 , м/с: 1—3 — 620, 4, 7, 9 — 518, 5, 8, 11 — 305, 6, 10, 12 — 157; x , мм: 1, 4, 5, 6 — 0, 2, 7, 8, 10 — 10, 3, 9, 11, 12 — 20.

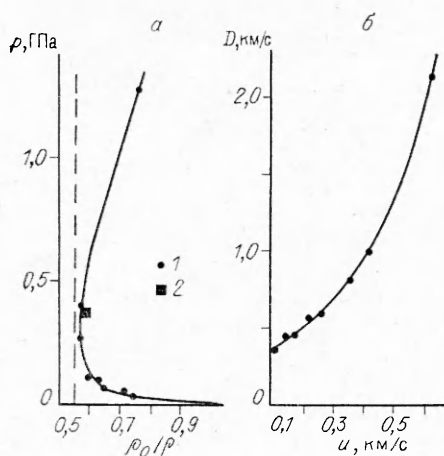


Рис. 3. Кривые динамической сжимаемости порошкообразного октанита. 1 — экспериментальные результаты; 2 — расчет.

плоскости D, u показана на рис. 3, б, а в плоскости $p, \rho_0/\rho$ — на рис. 3, а. Вертикальная штриховая линия определяет предельную степень уплотнения $\sigma = \rho_0/\rho_s = 0,55$ октанита, ассоциируемую с процессом гомогенизации вещества вследствие выборки порового пространства. Отличительная особенность поведения порошкообразного ВВ в изучаемом диапазоне динамических воздействий — нелинейность кривой динамической сжимаемости. Исследования показывают, что при $p \leq 0,4$ ГПа специфика поведения октанита обусловлена структурной неоднородностью его исходного состояния, а именно, влиянием прочности и морфологии исходных фракций порошка. Внутренний физический масштаб (размер зерна) также может оказывать определенное влияние на реологию волновой деформации ВВ. Деформации вещества в указанном диапазоне давлений необратимы, при этом чем выше давление динамического воздействия, тем больше степень уплотнения вещества во фронте волны.

При $p > 0,4$ ГПа кривая динамической сжимаемости в плоскости $p, \rho_0/\rho$ имеет аномальный ход: рост давления приводит к снижению плотности ударно-сжатого вещества. Физически это может быть связано с проявлением аномально высокого теплового давления матричной фазы порошка [5], а также с химическим разложением порошкообразного октанита в процессе ударного сжатия. В рассматриваемом случае, по-видимому, определяющим является процесс очагового химического разложения, что подтверждают результаты анализа профилей массовой скорости $u(t)$ (см. рис. 2).

Точка 2 на рис. 3, а с координатами $p_{ign}, \rho_0/\rho_{ign}$ на кривой динамической сжимаемости определяет расчетные значения пороговых условий инициирования химической реакции в порошкообразном октаните [6, 7]:

$$p_{ign} = \frac{2Y}{3} \ln \left[1 + \frac{1 - m_0}{m_0} \exp \left(\sqrt{\frac{3e_{ign}}{2Y}} \right) \right],$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_{ign}} = \sigma \left[1 - \exp \left(- \frac{3p_{ign}}{2Y} \right) \right]^{-1},$$

где Y — предел текучести; e_{ign} — приращение удельной (на единицу объема) внутренней энергии, необходимой для зажигания ВВ. Для порошкообразного октанита $p_{ign} = 0,4$ ГПа, $\rho_0/\rho_{ign} = 0,579$.

Расчет проведен при $m_0 = 0,45$, $\sigma = 0,55$, $Y = 0,2$ ГПа, $e_{ign} = 1$ ГПа. Полученные значения пороговых условий инициирования химической реакции также подтверждают вывод об определяющем влиянии процессов химического разложения на реологию волновой деформации октанита в области аномального хода кривой динамической сжимаемости исследуемого ВВ.

Механизм тепловой диссипации, приводящей к инициированию очаговой реакции, ассоциировался в работе [6] с пластическими деформациями пористого ВВ и работой вязких сил. Важно, что в силу локальной концентрации напряжений в окрестности пор эффекты местной пластичности приводят к необратимым средним деформациям вещества, а работа, затрачиваемая на закрытие пор и диссипируемая в тепло, служит дополнительным источником роста энтропии. Проявляющиеся при этом эффекты тепловой неравновесности, кардинально зависящие от микроструктуры ВВ, приводят к появлению так называемых горячих точек — локализованных областей динамических перегревов — и определяют возможность развития в веществе неравновесных физико-химических превращений.

Различные аспекты вязкопластического механизма возбуждения химической реакции в энергетическом материале наиболее полно обобщены в работах [8—13], развития (или роста) очага реакции — в работе [14]. Трансляционные источники генерирования тепла вследствие теплопередачи от разогреваемого при сжатии поры газа неэффективны в анализируемом диапазоне динамических воздействий по сравнению с источниками внутренней диссипации, связанной с реологическими (вязкопластическими) свойствами энергетического материала [15].

Представленные результаты, таким образом, свидетельствуют о существенном влиянии поверхностно-прочностных эффектов (прочности окрестности индивидуальных пор) на реологию волновой деформации порошкообразного ВВ в диапазоне низкоамплитудных динамических воздействий. Проявление реальной микроструктуры вещества приводит к термически неравновесным состояниям ВВ во фронте волны и предопределяет возможность его фронтального разложения. При этом определяет процесс инициирования очаговой химической реакции работа, затрачиваемая на закрытие пор и диссипируемая в тепло при гомогенизации пористого ВВ. Последнее свидетельствует также о структурной чувствительности глубины разложения пористого ВВ во фронте волны при низкоамплитудных динамических воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев В. С. Ударно-волновое инициирование конденсированных ВВ // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.— Черноголовка, 1977.— С. 12—20.
2. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. Переход горения в детонацию в пористых ВВ // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация и ударные волны: Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Черноголовка, 1986.— С. 134—139.
3. Аттетков А. В., Бойко М. М., Исаев А. Н. и др. Реология волновой деформации порошкообразных материалов при динамических воздействиях // V Всесоюз. совещание по детонации: Сб. докл.— Красноярск, 1991.— Т. 1.— С. 31—35.
4. Sandusky H. W., Beruecker R. R. Compressive reaction in porous beds of energetic materials // Eighth Symp. (Int.) on Detonation.— Albuquerque, New Mexico, 1985.— 2.— P. 631—640.
5. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.— 688 с.
6. Аттетков А. В. Критические условия инициирования химической реакции в твердом гетерогенном веществе // Шестой Всесоюз. съезд по теоретической и прикладной механике: Аннотации докл.— Ташкент, 1986.— С. 129.
7. Аттетков А. В., Соловьев В. С. О возможности разложения гетерогенных ВВ во фронте слабой ударной волны // ФГВ.— 1987.— 23, № 4.— С. 113—125.
8. Khasainov B. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S. et al. Shock wave predetonation processes in porous high explosives // Shock Waves, Explosions and Detonation: AIAA Progr. Astron. Aeron.— N. Y., 1983.— V. 87.— P. 492—511.
9. Khasainov B. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S. Two-phase viscoplastic model of chock initiation of detonation in high density pressed explosives // Seventh Symp. (Int.) on Detonation.— Annapolis, Maryland, 1981.— P. 435—448.
10. Frey R. B. Cavity collapse in energetic materials // Eighth Symp. (Int.) on Detonation.— Albuquerque, New Mexico, 1985.— V. 1.— P. 385—399.
11. Kim K. T., Sohn C.—H. Modelling of reaction buildup processes in shocked porous explosives // Ibid.— V. 2.— P. 641—649.

12. Maiden D. E., Nutt G. L. A hot-spot model for calculating the threshold for initiation of pyrotechnic mixtures // Eleventh Int. Pyrotechnics Seminar.— Chicago, Illinois, 1986.— P. 813—826.
13. Khasainov B. A., Attetkov A. V., Borisov A. A. et al. Critical conditions for hot-spot evolution in porous explosives // Dynamics of Explosions: AIAA Progr. Astron. Aeron.— Washington, 1988.— V. 114.— P. 303—321.
14. Хасайнов Б. А., Борисов А. А., Ермолаев Б. С. Развитие очага реакции в пористых энергетических материалах // Хим. физика.— 1988.— 7, № 7.— С. 989—998.
15. Аттетков А. В., Лазарев В. В. Разогрев и воспламенение энергетического материала при сжатии газовой поры // Тр. МГТУ.— 1989.— № 530.— С. 3—19.

г. Москва

Поступила в редакцию 28/1 1992

УДК 621.7.044.2; 621.733

И. В. Яковлев

ВЗРЫВНОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Использование при взрывном компактировании порошкообразной матрицы позволяет получать композиционные материалы, армированные в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Соотношение размеров армирующих волокон и частиц матричного материала определяющим образом влияет на физические процессы, происходящие при компактировании.

Возможности и перспективы использования энергии взрыва для получения металлических композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, представлены в работе [1]. Установлено, что следствием применения в качестве матрицы монолитных материалов в виде пластин и оболочек являются ограниченное (30 %) объемное содержание армирующих элементов и анизотропия свойств композита ввиду однонаправленности армирующих волокон.

Эти ограничения отсутствуют при создании армированных композиционных материалов с порошковой матрицей, и в [2] уже отмечалась предпочтительность получения композиционных материалов с порошкообразной матрицей с точки зрения обеспечения термодинамических условий на контактной границе матрица — волокно. Не менее принципиальна в такого типа композициях возможность армирования по меньшей мере в трех взаимно перпендикулярных направлениях, получая тем самым материал менее анизотропный, чем в случае однонаправленного армирования.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности взрывного компактирования армированных композиционных материалов с порошкообразной матрицей.

На рис. 1 представлена схема взрывного компактирования, а на рис. 2 — схема размещения армирующих волокон. Нагружение осуществляется скользящей детонационной волной через металлическую пластину. Исходная плотность образца соответствует плотности свободной засыпки, конечная — близка к плотности монолита.

Известно, что при взрывном компактировании основная причина, препятствующая получению сплошного материала, — волны разгрузки, нарушающие образующиеся в процессе консолидации частицы связи. В такой ситуации следует ожидать, что армирующие элементы будут играть двойную роль. Во-первых, препятствовать разрушению образовавшихся связей по границам частиц матрицы и границам матрица — волокно под действием растягивающих напряжений в волнах разгрузки. И, во-вторых, выполнять в дальнейшем собственно функцию арматуры в получаемом композиционном материале. При разработке схем взрывного компактиро-