РОСТ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ В ВОЛНЕ ДЕТОНАЦИИ

А. П. Ершов, В. Ф. Анисичкин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

При взрыве конденсированных ВВ избыточный углерод выделяется в виде атомов или небольших кластеров, которые далее объединяются в более крупные частицы. Типичный размер частиц алмаза, сохраненных после взрыва, составлял несколько нанометров [1–3]. Броуновская коагуляция должна приводить к значительно бо́льшим размерам (десятки нм). Естественно возникло представление об ограничении роста частиц из-за выхода из условно жидкого состояния при увеличении размеров [4, 5]. Позднее в продуктах взрыва безводородного ВВ бензотрифуроксана (БТФ) были обнаружены частицы размером в сотни нанометров [6], явно не подверженные размерным ограничениям (предположительно из-за более высокой температуры взрыва). Для таких частиц броуновская коагуляция оказывалась, наоборот, слишком медленной. В [7] отмечена важность турбулентности (либо сдвиговых течений) в продуктах детонации, которые возникают благодаря неоднородности вещества и способны резко ускорить коагуляцию.

Данные о динамике роста частиц в реальном времени, полученные методом малоуглового рассеяния пучка синхротронного излучения (СИ) [8] позволяют сравнить предсказания моделей роста с экспериментом. Кинетику неограниченного роста частиц с учетом сдвига примем в виде

$$v \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau_B} + \frac{Nv^{-2/3}}{\tau_S}, \ \tau_B = \frac{3\eta}{4kTn_0}, \ \tau_S = \frac{0,49}{\alpha\Gamma},$$

где N – среднее число атомов углерода в частице, константы τ_B , τ_S – характерные времена броуновской и сдвиговой коагуляции, η , T – вязкость и температура среды, n_0 – начальная концентрация атомов углерода, α – объемная доля углерода, Γ – градиент скорости в продуктах детонации (при развитии реакции из горячих точек по порядку величины равный обратному времени реакции). Расширение продуктов детонации, замедляющее рост, учитывается множителем $v = V/V_0$ в левой части уравнения. В правой же части выделено влияние расширения на градиент: $\Gamma \propto v^{-2/3}$. Расширение для цилиндрических зарядов происходит в основном в радиальном направлении. Принималась оценочная зависимость $v = (1 + t/\tau_H)^2$. Подбирались времена τ_B , τ_S и τ_H . Результаты расчета при $\tau_B = 4$ пс, $\tau_S = 0,11$ мкс, $\tau_H = 2,1$ мкс представлены на рис.1. Указанные времена согласуются с теоретическими оценками параметров детонации в пределах двоичного порядка.

В течение первой микросекунды расчет завышает размеры частиц приблизительно вдвое для компенсации начального занижения экспериментальных данных. Сигнал рассеяния СИ зависит от контраста – разности плотностей среды и частиц. Разлет вещества при детонации начинается с поверхности заряда, где контраст плотностей будет наиболее сильным. Наружные области, где можно ожидать образования сравнительно мелких частиц, будут избыточно представлены в рассеянном излучении, создавая впечатление медленного роста частиц на начальной

При детонации «обычных» ВВ, таких как состав ТГ, по достижении размера порядка 5 нм частицы перестают сливаться и начинается их агрегация во фрактальные кластеры [4]. Недавно этот факт был подтвержден в работах [9, 10]. Разреженные фрактальные агрегаты перекрывают все пространство, образуя своего рода аэрогель, что дополнительно блокирует рост. Однако из-за газодинамического расширения гель разрывается по слабым связям, что создает возможность медленного дальнейшего роста компактных частиц. Такой рост отмечен в [10] и может быть вызван, в частности, резонансом оптических и акустических мод колебаний атомов, вызванных соударениями частиц [11]. В веществах типа БТФ гель не успевает образоваться, так как частицы продолжают объединяться вплоть до стадии заметного расширения.

стадии.



Рис. 1. Сравнение расчетной динамики размеров частиц в БТФ с экспериментом. Точки – данные [8]

Литература

1. Волков, К. В. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ [Текст] / К. В. Волков, В. В. Даниленко, В. И. Елин // Физ. горения и взрыва. – 1990. – Т. 26, № 3. – С. 123–125.

2. Greiner, N. Roy. Diamonds in detonation soot [Text] / N. Roy Greiner, D. S. Phillips, J. D. Johnson, F. Volk // Nature. – 1988. –Vol. 333 – P. 440–442.

3. Лямкин, А. И. Получение алмазов из взрывчатых веществ [Текст] / А. И. Лямкин, Е. А. Петров,

А. П. Ершов и др. // ДАН СССР. – 1988. – Т. 302, № 3. С. 611–613.

4. **Ершов, А. П.** Образование фрактальных структур при взрыве [Текст] / А. П. Ершов, А. Л. Куперштох // Физ. горения и взрыва. – 1991. – Т. 27, № 2. – С. 111–117.

5. Даниленко, В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом [Текст]. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

6. **Мальков, И. Ю.** Образование алмаза из жидкой фазы углерода [Текст] / И. Ю. Мальков, В. И. Филатов, В. М. Титов и др. // Физ. горения и взрыва. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 131–134.

7. **Мальков, И. Ю.** Коагуляция углерода в условиях нестационарных течений продуктов детонации [Текст] // Физ. горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, № 5. – С. 155–157.

8. Ten, K. A. Carbon condensation in detonation of high explosives [Text] / K. A. Ten, V. M. Titov, E. R. Pruuel et al. // Proc. 15th Symposium (Internat.) on Detonation. San Francisco, CA, USA, 2014. – P. 369–374.

9. Hammons, J. A. Submicrosecond Aggregation during Detonation Synthesis of Nanodiamond [Text] / J. A. Hammons M. H. Nielsen, M. Bagge-Hansen et al. // The Journ. Phys. Chem. Letters. – 2021. – Vol. 12 (22). – P. 5286–5293.

10. **Рубцов, И. А.** Двухстадийная модель конденсации углерода при детонации конденсированных взрывчатых веществ [Текст] // Сибирский физический журнал. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 48–55.

11. **Анисичкин, В. Ф.** Явление резонансной твердофазной коалесценции малых частиц алмаза в продуктах взрыва [Текст] // Химическая физика. – 1993. – Т. 12, № 5. – С. 605–608.