

УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СИНТЕЗ ФУЛЛЕРЕНОВ ИЗ ГРАФИТА

Д. С. Долгушин, В. Ф. Анисичкин, Е. А. Петров*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

* Федеральный научно-производственный центр «Алтай», 659322 Бийск

Предложен новый метод получения фуллеренов, который основан на том, что в волне разрежения, образующейся при выходе ударной волны на свободную поверхность ударно-сжатого графита, распад кристаллов может происходить не на отдельные атомы углерода, а на молекулы фуллеренов. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие образование C_{60} при помощи ударной волны в образце графита $30 \div 35$ ГПа.

Известно, что кроме графита и алмаза углерод может образовывать ряд других структурных форм. Это различные сажи, фуллерены, нанотрубки [1, 2]. При ударном сжатии смесей графит — металл получены частицы углерода, в которых графитные слои замкнуты в виде сфер и вложены один в другой [3]. Подобные структуры размером $30 \div 35$ нм получены и при отжиге ультрадисперсной алмазной фазы в вакууме [4].

Традиционные способы получения фуллеренов заключаются в термическом испарении графита в среде гелия. Энергия, подводимая электрическим током или лазерным облучением, обычно выбирается таким образом, чтобы графит испарялся не в виде отдельных атомов, а в виде фрагментов, включающих в себя шестиугольные конфигурации атомов углерода. При этом фрагменты имеют небольшой размер, а формирование молекул $C_{60} - C_{70}$ происходит частично сразу после испарения, частично при обработке полученных продуктов бензолом [1].

Благоприятные условия для образования фуллеренов можно получить и при выходе ударной волны на свободную поверхность ударно-сжатого графита. Поскольку в кристаллической решетке графита связи между слоями слабее, чем между атомами в слое, расслоение графита в волне разрежения будет происходить на достаточно протяженные плоские чешуйки, состоящие из одного, двух или нескольких атомных слоев, которые, замыкаясь краями, могут образовывать молекулы фуллеренов.

Для изучения возможности образования фуллеренов в указанных условиях были проведены эксперименты, в которых пластинки из высокочистого графита толщиной 1 мм прикрепляли (через прокладку из медной фоль-

ги) к торцу зарядов тротил/октоген 20/80. Детонация зарядов осуществлялась в замкнутой камере объемом $0,7 \text{ м}^3$ при давлении гелия 1 МПа. Конденсированные углеродосодержащие продукты взрыва собирали для дальнейшего исследования.

Для извлечения фуллеренов часть исходной шихты в течение двух суток промывали нагретым бензолом, затем раствор отфильтровывали. После испарения бензола была получена темно-коричневая вязкая суспензия, которая составляла 0,03% массы заряда взрывчатого вещества и $\approx 1\%$ массы исходного графита. Первичную шихту, выпаренный из бензола осадок и отмытую бензолом высушенную шихту исследовали методом рентгеноструктурного анализа. Дифракционные линии фуллеренов (преимущественно C_{60}) [5] наблюдаются в первичной шихте и выпаренном из бензола осадке. В отмытой бензолом шихте, а также во взятых для сравнения продуктах детонации сплавов тротил/гексоген, полученных в аналогичных условиях, дифракционные линии фуллеренов не регистрируются.

Низкое содержание фуллеренов в данном случае, по-видимому, объясняется тем, что параметры ударной волны в проведенных экспериментах недостаточны для испарения графита в волне разрежения. Давление детонации сплава тротил/октоген 20/80 составляет ≈ 30 ГПа [6], при переходе ударной волны в графит из-за более высокой плотности графита давление возрастает примерно до 35 ГПа. Полная энергия, вводимая в графит ударной волной, $E = p(v_0 - v)/2$ составляет ≈ 2 МДж/кг. Такая мощность ударной волны на порядок меньше необходимой для полного испарения графита и меньше энергии превращения всего графита

в фуллерен ($\approx 3,2$ МДж/кг [7]). Кроме того, можно предположить, что существенное влияние оказывает ориентация кристаллов графита. Наиболее благоприятные условия для расщепления слоев с образованием фрагментов атомных плоскостей значительного размера могут быть реализованы, когда поверхность фронта ударной волны (и волны разрежения) параллельна плоскостям слоев кристалла, а в экспериментах использовались пластинки прессованного из порошка неориентированного графита.

Повышение давления в ударной волне, с одной стороны, представляется целесообразным для увеличения вводимой в образец графита энергии, но, с другой стороны, отрицательное влияние может оказать перестроение решетки графита в решетку алмаза [8], происходящее непосредственно в ударной волне при давлении $40 \div 55$ ГПа.

Предложенное направление исследований может представлять интерес для изучения поведения углерода при ударном сжатии и для создания новых методов получения фуллеренов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физ. наук. 1995. Т. 165, № 9. С. 977.
2. Керл Р. Ф., Смолли Р. Э. Фуллерены // В мире науки. Scientific American. 1991. № 12. С. 14.
3. Kleiman J., Heimann R. B., Hawken D., Salansky N. M. Shoc compression and flash heating of graphite/metal mixtures at temperatures up to 3200 K and pressures up to 25 GPa // J. Appl. Phys. 1984. V. 56, N 1. P. 1440–1454.
4. Мальков И. Ю., Титов В. М., Кузнецов В. Л., Чувиллин А. Л. Образование частиц углерода луковичной структуры из ультрадисперсного алмаза // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 130.
5. Kratschmer W. et al. Solid C₆₀: a new form of carbon // Nature. 1990. V. 347. P. 354–358.
6. Tanaka K. Detonation properties of condensed explosives computed using the Kihara–Hikita–Tanaka equation of state // National Chemical Laboratory for Industry, Tsukuba Research Center Vatabe. Japan, 1983.
7. Diogo H. P. et al. Enthalpy of formation of C₆₀ // J. Phys. Chem. Solid. 1997. V. 58, N 11. P. 1965–1971.
8. Зельдович Я. В., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

Поступила в редакцию 16/XI 1998 г.