<u>ΥCΠΕΧИ ΦИЗИЧЕСКИХ НАУК</u>

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Превращения фуллерита C₆₀ при высоких давлениях и температурах

В.В. Бражкин, А.Г. Ляпин

Кристаллы фуллерита C_{60} при воздействии высоких давлений и температур в зависимости от условий могут трансформироваться как в известные фазы углерода — алмаз и графит, так и в ряд метастабильных кристаллических и аморфных модификаций. Представлен обзор результатов исследования механических свойств, плотности и структуры этих модификаций. Сделан вывод о том, что плотные кристаллические фазы на основе молекул C_{60} имеют механические характеристики, в 2÷3 раза уступающие соответствующим показателям для алмаза; аморфные состояния углерода с большой долей sp³-конфигураций имеют механические свойства, близкие к "алмазным". Анализ литературных данных показывает, что из всех изученных на сегодняшний день углеродных материалов алмаз имеет наиболее высокие значения упругих модулей.

PACS numbers: 36.40.Ei, 61.46.+w

Открытие фуллеренов — многочастичных молекул углерода C_{60} , C_{70} и т.д., имеющих форму выпуклых многогранников, явилось одним из наиболее волнующих научных событий восьмидесятых годов [1]. При этом наибольшее внимание исследователей привлекла молекула C_{60} , имеющая форму правильного усеченного икосаэдра (см. рис. 1). Разработка эффективной технологии синтеза и глубокой очистки фуллеренов в 1990 г. привела к бурному росту исследований в этой области (см. [1]) и, в частности, к появлению новой области физики молекулярных кристаллов — физики фуллеритов. Фуллериты представляют собой конденсированные фазы связанных молекул фуллерена, взаимодействующих между собой посредством слабых ван-дер-ваальсовых сил.

Среди большого количества необычных свойств фуллеренов исследователи довольно давно обратили внимание на необычайно высокую механическую и химическую устойчивости молекулы C_{60} . Теоретически молекула должна быть устойчива и по отношению к внешним деформациям. Формальная оценка модуля объемного сжатия *В* для отдельной молекулы C_{60} , как произведения объема на вторую производную энергии по объему (в расчет принимался геометрический объем молекулы и суммирование энергий отдельных связей), дает величину от 720 до 900 ГПа [2, 3], т.е. молекула C_{60}

В.В. Бражкин, А.Г. Ляпин. Институт физики высоких давлений 142092 Троицк, Московская обл., Россия Тел. (095) 334-00-11; (095) 334-05-97 Факс (095) 334-00-12 E-mail: brazhkin@ns.hppi.troitsk.ru; alyapin@ns.hppi.troitsk.ru

Статья поступила 1 февраля 1996 г.

"менее сжимаема", чем кристалл алмаза ($B \approx 450$ ГПа). В принципе, в том, что углеродные кластеры могут иметь меньшую сжимаемость, чем алмаз, нет ничего необычного. Так, атомы в плоскостях графита тоже связаны прочнее, чем в алмазе, однако слабое взаимодействие между плоскостями приводит к тому, что графит мягкий, легко сжимаемый материал ($B \approx 34$ ГПа) [4].

Кристалл из молекул С₆₀, образующих гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку, при нормальных условиях также имеет высокую сжимаемость, которая примерно в 50 раз выше, чем для отдельно взятой молекулы (соответствующий объемный молуль $B \approx 18$ ГПа [5]). Высокая сжимаемость кристаллов фуллерита связана со слабым взаимодействием между молекулами С₆₀. Заметим, что при нормальных условиях молекулы C₆₀ имеют средний диаметр $D \approx 0,7$ нм, а ближайшие точки соседних молекул находятся на расстоянии $l \approx 0,3$ нм друг от друга [1], что сравнимо с расстоянием между плоскостями в графите (0,335 нм [6]). В то же время расстояние между ближайшими атомами в молекуле С₆₀ составляют 0,144 нм внутри пятиугольников и 0,139 нм между соседними вершинами двух расположенных рядом пятиугольников [1] (рис. 1).

В [2, 3] было сделано предположение, что если при высоких давлениях порядка 50 ГПа центры молекул C_{60} в кристалле сблизятся на расстояние около 0,7 нм, соответствующее касанию молекул в модели твердых сфер, то получившийся кристалл будет иметь объемный модуль, составляющий примерно 74 % (коэффициент плотнейшей упаковки шаров) от модуля отдельной молекулы. Оцененные величины объемного модуля такого кристалла $B \sim 620 \div 720$ ГПа превосходят в 1,5 раза соответствующие значения для алмаза. Однако в этих же работах отмечалось, что уже при меньших давлениях более вероятно разрушение молекул C_{60} .



Рис. 1. Молекула С₆₀, состоящая из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников, образующих усеченный икосаэдр.

можно было ожидать, что под давлением молекулы C₆₀ могут сблизиться достаточно для того, чтобы между ними возникло взаимодействие более сильное, чем вандер-ваальсово. Наличие такого взаимодействия может, по-видимому, приводить к появлению плотных фаз углерода, отличных от известных стабильных модификаций — алмаза и графита.

Активные исследования превращений в фуллеритах под давлением проводятся с 1991 г. За этот период на данную тему опубликовано более 50 научных работ. В результате проведенных исследований оказалось, что при комнатной температуре увеличение давления от атмосферного вплоть до давлений 20÷25 ГПа приводит к плавному изменению свойств фуллерита, за исключением слабой аномалии характеристик при ориентационном переходе (давление перехода 0,3÷0,4 ГПа) [7], который подробно изучен при атмосферном давлении (температура перехода $T \approx 260$ K) [1]. При давлениях P > 25 ГПа в гидростатических условиях или при $P > 16 \div 20$ ГПа при наличии сильных сдвиговых деформаций в кристаллах фуллерита наблюдаются структурные превращения [5, 8–14]. При высоких температурах превращения в кристаллах С₆₀ могут иметь место уже при более низких давлениях [15-20]. Нужно отметить, что образующиеся модификации углерода в большинстве случаев сохраняются в метастабильном виде при возвращении к нормальным условиям.

Опишем кратко характерную последовательность переходов при высоких давлениях и температурах.

При достаточном сближении молекул C_{60} становится возможным образование ковалентных связей между ними [5, 15–21]. Именно возникновение ковалентных связей сильно ограничивает дальнейшее сближение молекул. Расстояние между соседними молекулами не может быть меньше, чем 0, $14 \div 0$, 15 нм (характерная длина связи в углеродных материалах), так как при меньших расстояниях очень сильно возрастают силы отталкивания, обусловленные перекрытием атомных оболочек. При этом центры соседних молекул не могут оказаться друг к другу ближе, чем 0,85 нм. В итоге, гипотетические малосжимаемые фазы [2, 3] не реализуются; вместо них в зависимости от *P*, *T*-условий образуются различные модификации на основе молекул С₆₀, связанных ковалентными sp³- или π -связями [15–20, 22, 23].

При относительно невысоких давлениях (до 8 ГПа) могут образовываться одномерно- и двумерно-полимеризованные фазы из молекул С₆₀ [17, 18, 20, 22, 23]. Плотность данных модификаций ρ лежит в диапазоне от 1,8 до 2,5 г см⁻³. В зависимости от *P*, *T*-условий исходные ГЦК-кристаллы могут испытывать превращения в орторомбическую, тетрагональную, ромбоэдрическую и другие структуры (рис. 2). При давлениях P > 10 ГПа образуются еще более плотные кристаллические фазы ($\rho \approx 2, 5 \div 2, 8$ г см⁻³) [19]. Из данных о плотности и по структуре этих фаз можно предположить, что для рассматриваемых модификаций расстояния между молекулами С₆₀ во всех трех измерениях становятся сравнимы с расстояниями между соседними атомами углерода внутри молекулы. Следовательно, данные модификации можно рассматривать как трехмерно-полимеризованные фазы из молекул С₆₀, так и как упорядоченные трехмерные решетки из атомов углерода, в которых индивидуальные свойства молекул С₆₀ фактически утрачены. Заметим, что указанные превращения происходят при достаточно высоких температурах. С ростом давления температура, характерная для появления полимеризованных фаз, понижается. Наличие негидростатических условий может существенно влиять на тип и положение перехода [5].



Рис. 2. Одномерно- и двумерно-полимеризованные структуры фуллерита, моделирующие орторомбическую (а), тетрагональную (б) и ромбоэдрическую (в) фазы [22, 23].

Дальнейшее увеличение давления или температуры приводит к искажению и разрушению молекулы и образованию разупорядоченных фаз, причем атомы углерода в аморфной сетке могут находиться как в sp³, так и в sp² конфигурациях [9, 12, 13, 19]. Относительная доля sp³ и sp² конфигурация меняется в зависимости от *P*, *T*-условий вплоть до "аморфного алмаза" (полностью состоящего из атомов углерода в sp³ состоянии) при высоких давлениях [12, 13]. Плотность аморфных фаз также зависит от условий синтеза и лежит в диапазоне $2, 8 \div 3, 4$ г см⁻³ [12, 19]. Аморфные модификации углерода при нагревании под давлением переходят в смесь фаз алмаз и графит, имеющих области стабильности на фазовой *P*, *T*-диаграмме [14, 19].

Таким образом, структуры на основе молекул C_{60} и аморфные модификации углерода, полученные из фуллерита при высоком давлении, можно рассматривать как промежуточные состояния при неравновесных превращениях из метастабильных кристаллов C_{60} в стабильные модификации углерода — алмаз и графит. Такие промежуточные углеродные фазы представляют несомненный интерес с точки зрения их механических характеристик, а также электрофизических и оптических свойств.

Фуллерит С₆₀ как в ГЦК-фазе, так и в ориентационноупорядоченной фазе под давлением является узкозонным полупроводником [1, 8, 24], причем ширина запрещенной зоны уменьшается с ростом давления. Однако в области давлений, соответствующих разрушению молекул фуллерена и образованию разупорядоченных фаз ($20 \div 25$ ГПа при комнатной температуре; $12 \div 15$ ГПа при T = 400 °C), ширина ее возрастает [8]. Это отвечает появлению значительной доли ковалентных sp³ состояний. Проводящие свойства одномерно- и двумернополимеризованных фаз, по-видимому, существенно зависят от типа и геометрии связей, образующихся между молекулами C₆₀ (см., например, [22, 25]). Активные исследования в этой области начались совсем недавно.

Рамановские спектры некоторых метастабильных фаз, полученных из C_{60} , представлены на рис. 3 вместе с соответствующими структурными данными рентгеновской дифракции. Любопытно, что упорядоченная модификация (кривая 2) имеет спектр комбинационного рассеяния, который в отсутствие структурных данных мог бы быть приписан разупорядоченной фазе. Отмеченное обстоятельство указывает на необходимость более аккуратной интерпретации рамановских спектров, полученных при высоком давлении. Так в [9, 10] наблюдались широкие асимметричные рамановские пики, в интервале 1300 ÷ 1650 см⁻¹, появление которых было связано (в отсутствие структурных данных) с переходом в аморфную фазу.



Рис. 3. Структурные факторы рентгеновского рассеяния (а) и спектры комбинационного рассеяния (б) от исходного фуллерита (I) и от образцов, полученных из C₆₀ при нагревании в условиях высокого давления (12,5 ГПа), из [19]; 2 соответствуют ГЦК-фазе из молекул C₆₀, связанных ковалентными связями; 3 — аморфный углерод с преобладанием sp³ связей; 4 — разупорядочениая фаза, в которой наблюдается частичное упорядочение в алмаз и графит, связанное с высокой температурой нагрева под давлением (700 °C). Показаны положения рамановских пиков алмаза (1333 см⁻¹) и поликристаллического графита (1584 и 1622 см⁻¹) [6].

С точки зрения поиска сверхтвердых материалов наибольший интерес вызывают упругие и механические свойства новых углеродных фаз. Начиная с первых работ по исследованию фуллеритов под давлением, отмечалось, что полученные модификации имеют высокие модули сжатия и, возможно, твердость [5]. В [26] сообщалось о наблюдении следов пластической деформации на поверхности алмазной наковальни, оставленных образцом фазы высокого давления фуллерита. На основании этих данных был сделан вывод о том, что модификация высокого давления, полученная из С₆₀, может быть тверже алмаза. К сожалению, ни в этой, ни в большинстве других работ не проводилась однозначная идентификация фаз высокого давления фуллерита. В дальнейшем в научных и научно-популярных изданиях сообщалось о получении как полимерных, так и аморфных модификаций углерода с твердостью выше, чем у алмаза [27, 28]. Заключения о твердости делались на основе тестов царапания в соответствии с относительной минералогической шкалой Мооса. В [12, 13] отмечалось, что полученный из фуллерита "аморфный алмаз" имеет твердость выше, чем у сапфира, причем сравнение проводилось также с помощью царапания.

Необходимо отметить, что шкала "царапания" Мооса является весьма грубой, а для сверхтвердых материалов она недостаточно корректна. Согласно этой шкале корунд имеет значение твердости 9 единиц, а алмаз — 10. В то же время прямые измерения показывают, что твердость корунда по Виккерсу ($H_V \approx 25 \Gamma \Pi a$) в 3÷5 раз уступает значению для алмаза $(H_{\rm V} \sim 70 \div 140 \ \Gamma \Pi a \ [6])$. Таким образом, все материалы с твердостью между 20 ГПа и 140 ГПа будут иметь близкие значения твердости по Моосу между 9 и 10. К тому же часто бывает так, что материалы царапают друг друга, но это не значит, что их твердости равны. Способность поцарапать зависит от условий эксперимента, таких, как величина прикладываемой нагрузки, форма и радиус закругления царапающего острия и т.д.

Путем обработки фуллерита при различных температурах при давлении 12,5 ГПа удалось получить широкий спектр промежуточных модификаций углерода при превращении фуллерита в смесь алмаз-графит [19]. При этом как фазы на основе молекул С₆₀, так и аморфные модификации углерода были синтезированы в виде объемных образцов (цилиндры 2 мм диаметром и 2 мм высотой), что позволило впервые количественно исследовать их механические характеристики. Оказалось, что фазы, состоящие из молекул С₆₀, с плотностью $\rho \approx 2,5 \div 2,8$ г см⁻³ имеют модуль Юнга $E \sim 300 \div$ ÷400 ГПа, твердость по Виккерсу $H_V \sim 20 \div 30$ ГПа, предел текучести $\sigma_{\rm y} \sim 10 \div 15$ ГПа. Эти величины в 2÷4 раза уступают показателям для алмаза $(E \sim 1100 \ \Gamma\Pi a, H_V \sim 70 \div 140 \ \Gamma\Pi a, \sigma_v \sim 30 \div 60 \ \Gamma\Pi a$ [6]). Интересно, что данные "полимерные" модификации имеют высокую пластичность даже при комнатной температуре, что уникально для материалов с такой твердостью. Заметим, что для сверхтвердых материалов объемный модуль В составляет, как правило, 40 ÷ 50 % по величине от модуля Юнга [6], т.е. для "полимерных" фаз *B* ~ 120 ÷ 200 ГПа. Приведенная оценка хорошо согласуется с данными по сжимаемости [5], согласно которым объемный модуль фуллерита при $P \sim 20 \div 25 \ \Gamma \Pi a$ (т.е. при давлении полимеризации для комнатной температуры) составляет 120÷150 ГПа. Теоретические оценки модуля *В* двумерно-полимеризованных фаз [23] дают величину $B \sim 170$ ГПа, что также хорошо согласуется с экспериментальными данными [19].

Аморфные модификации углерода с большой долей (до 80 %) sp³ конфигураций и с плотностью $\rho \approx 3 \div 3, 2 \text{ г см}^{-3}$ имеют модуль Юнга $E \sim 70$ ГПа, твердость $H_{\rm V} \sim 60 \div 80$ ГПа, предел текучести $\sigma_{\rm y} \sim 35 \div 45$ ГПа и коэффициент трещиностойкости $K_{\rm 1C} \sim 12 \div 15$ МН м^{-3/2} (см. методику измерения в [29]). Следовательно, по механическим характеристикам аморфные фазы лишь немного уступают соответствующим показателям для алмаза, а по трещиностойкости в 1, 5 ÷ 2 раза их превосходят (для алмаза $K_{\rm 1C} \sim 5 \div 12$ МН м^{-3/2} [6]).

Заметим, что кроме модуля Юнга, который главным образом зависит от микроскопических межатомных сил, все остальные механические параметры (твердость, прочность, предел текучести, трещиностойкость) существенно зависят также и от количества примесей и дефектов, размера и морфологии зерна в конкретном образце. Именно этим объясняется широкий разброс приведенных выше значений характеристик для алмаза. По твердости различные алмазы могут различаться в 2 раза: от 70 до 140 ГПа. Более того, существуют поликристаллы алмаза с ультрамелким зерном, обладающие твердостью $H_V > 200$ ГПа. В двух предельных случаях — монокристалла без вакансий и дислокаций и аморфного состояния или кристалла с ультрамелким зерном — твердое тело может иметь твердость и прочность порядка модуля сдвига G (в случае алмаза модуль сдвига $G \sim 450 \ \Gamma \Pi a$ [6]).

Таким образом, используя высокие давления, из фуллерита удается получить плотные твердые модификации как на основе молекул С₆₀, так и аморфные фазы с большой долей sp³ конфигураций. Однако идея о возможности создания вещества на основе молекул С₆₀ с упругими модулями и твердостью выше, чем у алмаза, по-видимому, оказалась ошибочной. Из всех известных на сегодняшний день материалов алмаз имеет наиболее высокие упругие модули. Что же касается твердости, то, как отмечалось выше, данная характеристика сильно зависит от конкретной концентрации примесей и дефектов в образце. Экспериментально измеряемая твердость зависит также и от величины прикладываемой нагрузки. Вышеприведенные значения соответствуют нагрузкам 5÷20 Н. При уменьшении нагрузки измеряемая твердость может возрастать в несколько раз и в пределе приближается к значению для идеального кристалла, т.е. становится порядка модуля сдвига. Корректное сравнение твердости различных материалов с относительно близкими характеристиками может проводиться только при одинаковых нагрузках.

Заметим, что существует корреляция между упругими модулями и удельным объемом в расчете на атом, а точнее на валентный электрон. Эта корреляция может быть понята как из анализа различных электронных вкладов в энергию сцепления твердого тела, так и из упрощенного рассмотрения межатомного взаимодействия в терминах отдельных химических связей с определенной энергией и жесткостью [30, 31]. Для веществ с одинаковым набором атомов в первом приближении достаточно сравнивать обычную плотность. Так, плотность алмаза (3,52 г см⁻³) превосходит плотность фуллерита (~ 1,7 г см⁻³), графита (~ 2,3 г см⁻³) и полимерных фаз на основе молекул C_{60} (2, 5 ÷ 2, 8 г см⁻³), но уступает почти в 2 раза условно введенной плотности отдельной молекулы С₆₀ (~ 6, 3 г см⁻³). Напомним, что оценка величины объемного модуля отдельной молекулы С₆₀ также почти в 2 раза превосходит значение для алмаза. При этом необходимо еще раз подчеркнуть, что нет ничего необычного в том, что кластеры С₆₀ имеют модули выше алмаза. Сенсационность оценок — это следствие некоторого недоразумения. Если рассматривать небольшие углеродные кластеры (N < 60), то окажется, что их условные объемные модули и плотность еще выше. Так, отдельно взятые гипотетические тетраэдр, октаэдр и куб из атомов углерода со связями, характерными для алмазной решетки, будут иметь условный объемный модуль, соответственно, в 40, 20 и 9 раз выше, чем у алмаза. При этом для расчетов во внимание принимается геометрический объем кластера.

Любопытно, что соотношение между плотностью и упругими характеристиками для упорядоченных трехмерно-полимеризованных фаз фуллерита находится в хорошем согласии с аналогичными данными, теоретически рассчитанными для разупорядоченных sp² – sp³ сеток углерода с различной долей трехвалентных и четырехвалентных состояний [32]. Трехвалентные атомы (sp² состояния) имеют более короткие и жесткие связи, чем атомы в sp³ состояниях, что уже отмечалось выше для случая графита. Однако увеличение доли sp² состояний в аморфных углеродных сетках приводит к понижению среднего координационного числа и, как следствие, к значительному понижению топологической жесткости сетки [33] и уменьшению плотности. В общем случае разупорядоченной ковалентной структуры дальнейшее понижение среднего числа ближайших соседей Z приводит сначала к потере трехмерной жесткости (Z = 2, 67), а затем и к полному исчезновению топологической устойчивости (Z = 2, 4) [33].

Связи в молекуле C_{60} также более короткие и жесткие, чем в решетке алмаза. Однако появление ковалентных связей при высоком давлении не только препятствует дальнейшему сближению молекул C_{60} , но и приводит к заметному нарушению однородности сжатия молекул фуллерита, а впоследствии к их деформации и разрушению.

В заключение можно отметить, что углерод как в упорядоченном, так и в неупорядоченном виде с боль-

шой долей атомов в sp² состояниях имеет упругие и механические характеристики, которые уступают алмазным. Таким образом, среди известных на данный момент объемных углеродных материалов наивысшую плотность и механические параметры имеет алмаз.

Авторы выражают благодарность С.М. Стишову и С.В. Поповой за плодотворные дискуссии.

Список литературы

- 1. Елецкий А В, Смирнов Б М УФН 165 977 (1995)
- 2. Ruoff R S, Ruoff A L Nature 350 663 (1991)
- 3. Ruoff R S, Ruoff A L Appl. Phys. Lett. 59 1553 (1991)
- 4. Hanfland M, Beister H, Syassen K Phys. Rev. B 39 12598 (1989)
- 5. Duclos S J et al. *Nature* **351** 380 (1991)
- Курдюмов А В и др. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора. Справочник (М.: Металлургия, 1994)
- 7. Jephcoat A P et al. Europhys. Lett. 25 429 (1994)
- 8. Regueiro M N, Monceau P, Hodeau J L Nature 355 237 (1992)
- 9. Regueiro M N et al. Phys. Rev. B 46 9903 (1992)
- 10. Snoke D W, Raptis Y S, Syassen K Phys. Rev. B 45 14419 (1992)
- 11. Regueiro M N et al. Nature 354 289 (1991)
- 12. Hirai H, Kondo K Appl. Phys. Lett. 64 1797 (1994)
- 13. Hirai H et al. *Phys. Rev. B* **52** 6162 (1995)
- 14. Yoo C S, Nellis W J Science 254 1489 (1991)
- 15. Yoo C S, Nellis W J Chem. Phys. Lett. 198 379 (1992)
- 16. Yamawaki H et al. J. Phys. Chem. 97 11161 (1993)
- 17. Iwasa Y et al. Science 264 1570 (1994)
- 18. Kikuchi K et al. *Chem. Lett.* **255** 1607 (1991)
- 19. Бражкин В В и др. *Письма в ЖЭТФ* **6**2 328 (1995)
- 20. Bashkin I O et al. J. Phys.: Condens. Matter 6 8989 (1994)
- 21. Haines J, Leger J M Solid State Commun. 90 361 (1994)
- 22. Xu C H, Scuseria G E Phys. Rev. Lett. 74 274 (1995)
- 23. Nunnez-Regueiro M et al. Phys. Rev. Lett. 74 278 (1995)
- 24. Saito S, Oshiyama A Phys. Rev. Lett. 66 2637 (1991)
- 25. Harigaya K Phys. Rev. B 52 7968 (1995)
- 26. Бланк В Д и др. ЖТФ 64 153 (1994)
- Blank V D et al., in Abstracts of Joint XV AIRAPT & XXXIII EHPRG Int. Conf. "High Pressure Science & Technology" (Warsaw, Poland, September 11–15, 1995) (Warsaw: Warsaw University, 1995) p. 197
- 28. Бланк В Д, Буга С Г Наука и жизнь (10) 61 (1995)
- 29. Evans A G, Wilshaw T R Acta Metall. 24 939 (1976)
- Ashcroft N W, Mermin N D Solid State Physics (New York: Holt, Rinehart and Wiston, 1976)
- 31. Harrison W A *Electronic Structure and the Properties of Solid* (San Francisco: Freeman, 1980)
- 32. Kelires P C Phys. Rev. Lett. 73 2460 (1994)
- 33. Tanaka K Phys. Rev. B 39 1270 (1989)

Transformations of C₆₀ fullerite under high pressure-high temperature conditions

V.V. Brazhkin, A.G. Lyapin Institute of High Pressure Physics, 142092 Troitsk, Moscow Region, Russia Tel. (7-095) 334-00 11; (7-095) 334-05 97 Fax (7-095) 334-00 12 E-mail: brazhkin@ns.hppi.troitsk.ru; alyapin@ns.hppi.troitsk.ru

Depending on pressure–temperature conditions, fullirite crystals can transform as to the well-known carbon phases, graphite and diamond, and to new metastable crystalline and amorphous modifications. The mechanical properties, density and structural data of the new phases are reviewed. It is concluded that the crystalline C_{60} polymers have mechanical characteristics $2 \div 3$ times lower than that for the diamond; amorphous states of carbon with a large share of the sp³-configurations have mechanical properties close to those of the diamond. The analysis of current literature enables us to conclude that the diamond has the highest elastic moduli among the carbon materials studied up to date.

PACS numbers: 36.40.Ei, **61.46.**+**w** Bibliography — 33 references