

УДК 539.219.1

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ФУЛЛЕРЕНОМ C_{60} С ЖЕЛЕЗОМ И АЛЮМИНИЕМ

© 2020 г. П. А. Борисова¹, М. С. Блантер^{2, *}, В. В. Бражкин³, В. П. Филоненко³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“МИРЭА – Российский технологический университет”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики высоких давлений
имени Л.Ф. Верещагина Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: mike.blanter@gmail.com

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Методом дифракции нейтронов исследовано влияние добавок металлов на фазовые превращения при высоких температурах и высоких давлениях в фуллерене C_{60} в “аморфном” состоянии и в виде ГЦК-структуры. Обнаружено, что введение металлов в кристаллический фуллерен C_{60} существенно повышает температуру его превращения в разориентированный графит. В “аморфном” фуллерене подобный эффект не наблюдается из-за компенсации влияния металлических добавок снижением устойчивости фуллерена из-за “аморфизации”, создаваемой предварительной механоактивацией.

DOI: 10.31857/S0367676520070078

ВВЕДЕНИЕ

Металл-матричные композиционные материалы широко используются в авиации, железнодорожном транспорте, автостроении, судостроении и ряде других областей промышленности. С появлением углеродных наноматериалов (фуллеренов, углеродных нанотрубок, графена), обладающих уникальными механическими и физическими свойствами, малым удельным весом и высокими антифрикционными свойствами, начались интенсивные разработки металл-матричных композитов с этими углеродными наноматериалами [1–7]. Для создания композиций и технологий производства таких материалов необходимо изучение взаимодействия металлов с углеродными нанотрубками, графеном и фуллеренами, в том числе происходящих в них фазовых превращений при высоких температурах (ВТ) и высоких давлениях (ВД) [8–15]. Фуллерены, будучи метастабильными модификациями углерода, обладают высокой химической активностью и при взаимодействии с металлами образуют разнообразные металлофуллерены [16–20], однако об образовании металлофуллеренов при производстве металл-матричных композитов не сообщалось. Несмотря на большое число исследований взаимодействия фуллеренов с металлами, структуры и свойств металл-матричных компози-

ционных наноматериалов с фуллеренами, ряд вопросов изучен явно недостаточно. Это в первую очередь касается исследования фазовых превращений в фуллеренах, входящих в композиты. В частности, в металл-матричных композиционных наноматериалах с фуллеренами такие исследования в основном проведены с малым содержанием фуллерена (1–5 об. % [5, 6, 21–23]), что затрудняет исследование фазовых превращений в фуллеренах при термобарическом воздействии [8–14], в том числе при изготовлении композитов в условиях ВТВД. Представляет также интерес исследование в композитах взаимодействия “аморфных” (полученных механоактивацией) фуллеренов с металлами, так как таких публикаций немного [12, 22, 24–27].

В настоящей работе методом дифракции нейтронов исследованы фазовые превращения при высоких температурах (до 1100°C) и высоких давлениях (2 и 8 ГПа) в “аморфном” и кристаллическом фуллерене C_{60} с небольшими концентрациями (~7 ат. %) кристаллических металлов – Al и Fe.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования были использованы порошки фуллерена C_{60} чистотой 99.95%. Фуллерены исследовали в исходном кристаллическом и неупо-

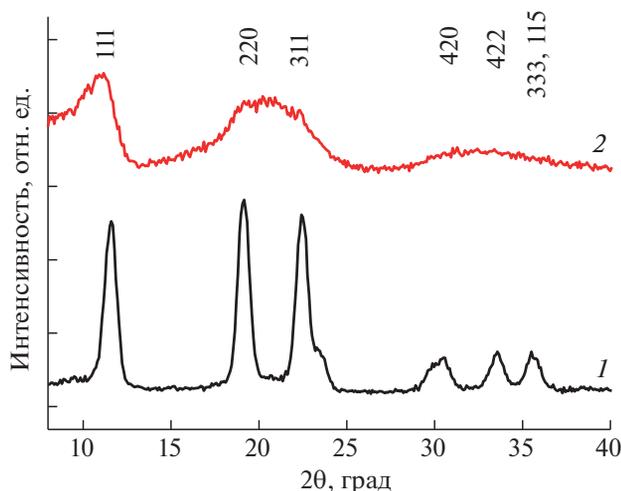


Рис. 1. Дифракционные нейтронные спектры кристаллического ГЦК (1) и “аморфного” (2) фуллерена C_{60} .

рядоченном (“аморфном”) состояниях. В кристаллическом состоянии исходный фуллерен C_{60} имел ГЦК-структуру (рис. 1). Это согласуется с известными литературными данными [10, 11]. Механоактивацию кристаллических порошков фуллеренов проводили в шаровой мельнице типа Fritsch в течение длительного времени (до 100 ч) в атмосфере аргона при комнатной температуре. Механоактивацию заканчивали тогда, когда на нейтронных дифрактограммах на месте дифракционных максимумов появлялись широкие гало (рис. 1). Такое разориентированное состояние фуллерена будем для удобства называть “аморфным”, в отличие от разориентированного состояния графита. Порошки кристаллического или “аморфного” фуллерена смешивали с порошками кристаллического Al или Fe (7 ат. % по шихтовому составу) путем механического перемешивания в активаторе шаровой мельницы в течение 15 мин. На нейтронных дифрактограммах смесей были видны максимумы кристаллического или широкие гало “аморфного” фуллерена C_{60} , а также сильные линии ОЦК Fe (в смесях с Fe). В смеси с Al нейтронные дифракционные максимумы Al на фоне углеродных гало или максимумов видны намного хуже, что объясняется его намного меньшей амплитудой рассеяния нейтронов [28]. Линии Fe не уширились после кратковременного перемешивания в шаровой мельнице, т.е. не произошла аморфизация железа.

Использование нейтронной дифракции позволило более детально отследить структурные изменения в компактах после ВДВТ. Так, по нейтронной дифракции хорошо видны изменения в углеродной фазе в широкоуголовом диапазоне. Само нейтронное рассеяние можно считать изотропным, и интенсивность рассеянных одним ядром нейтронов не зависит от угла рассеяния.

Синтез образцов из описанных выше смесей при ВТ (500, 800 и 1100°C) и ВД (2 и 8 ГПа) проводили в камере высокого давления тороидального типа в квазигидростатических условиях [29]. При комнатной температуре образец нагружали до необходимого давления в ячейке из литографского камня, помещенной между наковальнями специального профиля из твердого сплава. Давление определяли при комнатной температуре путем измерения электрического сопротивления V_i , и калибровку проводили по давлению его фазовых переходов (2.55 и 7.7 ГПа). Погрешность определения давления составляла ± 0.2 ГПа и температурный градиент по высоте образца не превышал 20°C. Образец нагревали до заданной температуры, выдерживали 3 мин, быстро охлаждали до комнатной температуры и разгружали. Получался плоский цилиндрический образец (таблетка) диаметром 5 мм и толщиной ~ 2 мм. Все дальнейшие исследования на этих образцах проводили при нормальном давлении и комнатной температуре *ex-situ*.

Для исследования структуры образцов был использован метод дифракции нейтронов. Монохроматический поток нейтронов охватывал весь образец. Подавляющее большинство работ по исследованию структуры фуллеренов выполнено рентгеновским методом [например, 9–11, 14, 30, 31] и намного меньшее – методом дифракции нейтронов [8, 15, 32]. Использование нейтронов позволяет “просветить” весь образец, не разрушая его, а также выявить особенности дифракционных спектров разориентированного графита, образующегося при ВТВД из фуллерена, которые не выявляются рентгеновским методом. Связано это с тем, что с увеличением дифракционных углов интенсивность линий на рентгеновских спектрах быстро уменьшается, и в большинстве работ на рентгеновских спектрах разориентированного графита удается наблюдать только самый сильный размытый максимум (002). При использовании нейтронов [15] удается получать на образцах разориентированного графита широкоуголовую картину дифракции (3–4 размытых максимума). Это дает принципиально новую информацию о строении и свойствах этой фазы и влиянии на нее введенных в исходный фуллерен алюминия или железа. Исследование проводили на многодетекторном (224 детектора) дифрактометре ДИСК [33] при мощности ядерного реактора 4–5.5 МВт, на длине волны монохроматических тепловых нейтронов $\lambda = 0.1668$ нм.

Ранее по зависимости скорости ультразвука и высоты рентгеновского пика (002) от направления в синтезированных образцах со структурой разориентированного графита, образовавшегося из фуллерена при ВТВД, обнаружили анизотропию [34, 35]. Эта анизотропия наблюдалась в условиях негидростатического давления. Аналогичное явление также было обнаружено более от-

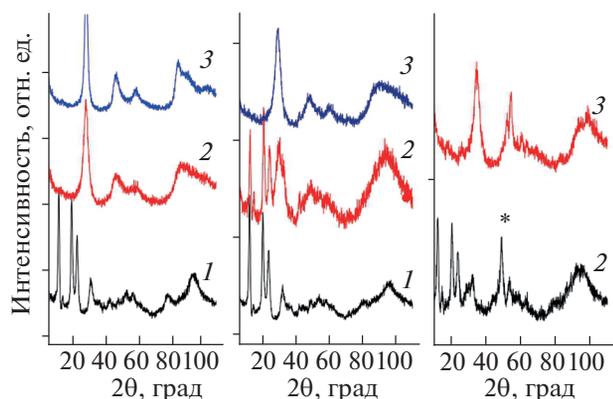


Рис. 2. Дифракционные нейтронные спектры фаз, полученных при синтезе образцов кристаллического фуллерена C_{60} при давлении 8 ГПа и температурах 500 (1), 800 (2) и 1100°C (3). Слева – фуллерен без металлических добавок; в середине – с 7 ат. % Al; справа – с 7 ат. % Fe. Звездочка отмечает сильнейшую линию (110) ОЦК Fe.

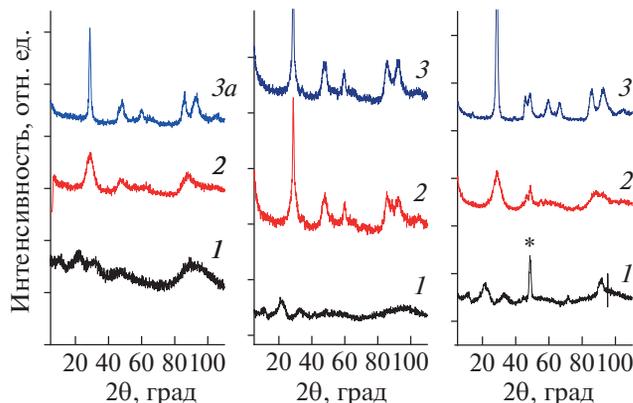


Рис. 3. Дифракционные нейтронные спектры фаз, полученных при синтезе образцов “аморфного” фуллерена C_{60} при давлении 8 ГПа и температурах 500 (1), 800 (2), 1100 (3) и 1050°C (3a). Слева – фуллерен без металлических добавок; в середине – с 7 ат. % Al; справа – с 7 ат. % Fe. Звездочка отмечает сильнейшую линию (110) ОЦК Fe.

четливо в кристаллическом и “аморфном” фуллеренах C_{70} методом дифракции нейтронов [15]. В настоящей работе для исследования анизотропии продуктов превращения “аморфного” и кристаллического фуллерена C_{60} с металлическими добавками был также применен метод дифракции нейтронов. Образцы-таблетки исследовались при двух положениях относительно пучка нейтронов: в одном, когда пучок нейтронов падал на плоскую сторону образца, в другом – на цилиндрическую поверхность. В таком эксперименте нейтроны имеют преимущество перед рентгеновским излучением, даже таким мощным, как синхротронное. Из-за очень слабого поглощения нейтронов можно исследовать анизотропию образца без его деструкции. При прохождении пучка нейтронов вдоль плоскости образца (пучок падает на цилиндрическую поверхность) и поперек ее (длина пути нейтронов в образце ~5 и ~2 мм соответственно) из-за очень слабого поглощения нейтронов можно пренебречь различием в длине пути нейтронов. В случае использования рентгеновского излучения эта разница в длине пути, пройденного в образце излучением, внесет значительный вклад в интенсивность и потребует вырезать специальный кубический образец из исходного образца-таблетки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фуллерен C_{60} без металлических добавок

На рис. 2 (слева) представлены нейтронограммы образцов кристаллического фуллерена C_{60} без металлических добавок, синтезированных при давлении 8 ГПа и различных температурах. В легированном кристаллическом фуллерене при

500°C сохраняется кристаллический ГЦК-фуллерен с наиболее интенсивными максимумами (111), (220) и (311) и существенно менее интенсивными – при больших дифракционных углах. При 800°C кристаллический фуллерен превращается в разориентированный графит, в спектре которого наблюдаются три-четыре гало, характерные для разупорядоченного графита. Эти гало располагаются на дифракционных углах $2\theta \approx 28^\circ, 48^\circ$ и 90° , которые соответствуют положению сильных линий кристаллического графита (002) ($2\theta = 28.6^\circ$), (101) ($2\theta = 48^\circ$), (110) ($2\theta = 85.8^\circ$) и (112) ($2\theta = 91^\circ$). Последние гало ассиметричны со стороны больших дифракционных углов. При 1100°C также получается разориентированный графит. Изменение давления от 2 до 8 ГПа не оказывает принципиального влияния на эту схему фазовых превращений. Наблюдаемые в настоящей работе фазовые превращения кристаллического фуллерена C_{60} при ВТВД хорошо согласуются с данными многочисленных работ [9–11].

В “аморфном” фуллерене C_{60} без металлов (рис. 3, слева) после синтеза при 8 ГПа и 500°C сохраняется “аморфный” фуллерен, а при 800 и 1050°C образуется разориентированный графит, как и в случае кристаллического фуллерена C_{60} . Гало этого разориентированного графита располагаются при тех же дифракционных углах, как и в случае его образования из кристаллического фуллерена C_{60} (рис. 2, слева) или “аморфного” или кристаллического фуллерена C_{70} [15].

Влияние добавок металлов

Присутствие Al и Fe не изменяет описанную выше схему фазовых превращений, но существенно по-

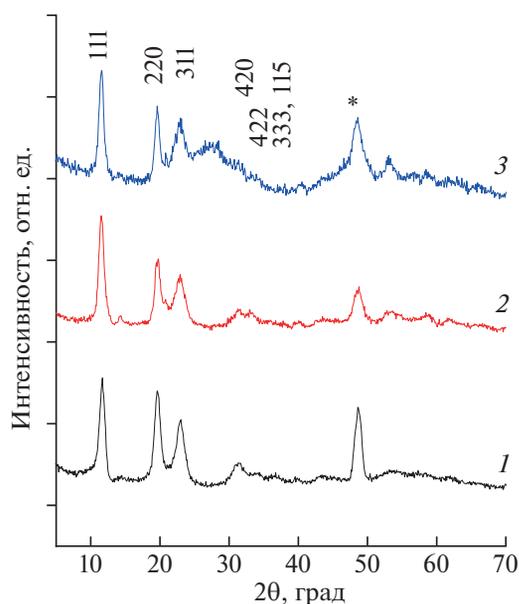


Рис. 4. Дифракционные нейтронные спектры кристаллического фуллерена C_{60} с 7 ат. % Fe, синтезированного при 2 ГПа и различных температурах: 500 (1), 800 (2) и 1100°C (3). Звездочка отмечает сильнейшую линию (110) ОЦК Fe.

вышает устойчивость фуллерена к термобарическому воздействию (рис. 2, центр и справа; табл. 1). В кристаллическом фуллерене оба легирующие элемента (Al и Fe) существенно замедляют

превращение фуллерена в разориентированный графит (повышают температуру превращения). Если в фуллерене без добавок кристаллический ГЦК-фуллерен наблюдался в образцах, синтезированных при 500°C (2 и 8 ГПа), а при 800°C образуется разориентированный графит, то в фуллерене с добавками кристаллический фуллерен с ГЦК-решеткой сохраняется при температуре синтеза 800°C, т.е. температура превращения кристаллического фуллерена в разупорядоченный графит повышается не меньше, чем на 300°C. В кристаллическом фуллерене с железом при 2 ГПа кристаллический фуллерен сохраняется даже при 1100°C (рис. 4). Такое сильное торможение превращений в фуллерене за счет металлических добавок – новый, интересный и необычный результат, не описанный в литературе.

Различие между фуллеренами с алюминием и железом проявляется в том, что образующийся при 1100°C разориентированный графит в фуллерене с железом уже начинает превращаться в нанокристаллический графит, тогда как в фуллерене без добавок и в фуллерене с алюминием в дифракционном спектре наблюдаются широкие гало, типичные для разориентированного графита. Слабое различие во влиянии на превращения фуллерена при ВТ и ВД двух металлов, различным образом взаимодействующих с углеродом (Al и Fe) является также неожиданным результатом, требующем дальнейшего исследования.

Таблица 1. Фазы, образующиеся при ВТВД в кристаллическом и “аморфном” фуллерене C_{60} с металлическими добавками при разных температурах и давлениях

Кристаллический C_{60}						
$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ГПа}$					
	2	8	2	8	2	8
1100	РГ	РГ	РГ	РГ	КФ	РГ
800	РГ	РГ		КФ	КФ	КФ
500	КФ	КФ	КФ	КФ	КФ	
“Аморфный” C_{60}						
$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ГПа}$					
	4.5	8	2	8	2	8
1100			РГ	РГ	РГ*	РГ*
1050		РГ*				
900	РГ	РГ				
800		РГ	РГ	РГ	РГ	РГ
500	АФ	АФ	АФ	АФ	АФ	АФ
	C_{60}		$C_{60} + 7 \text{ ат. \% Al}$		$C_{60} + 7 \text{ ат. \% Fe}$	

Обозначения фаз: РГ – разориентированный графит; РГ* – РГ на стадии превращения в нанокристаллический графит; КФ – кристаллический фуллерен; АФ – “аморфный” фуллерен.

В “аморфном” фуллерене с металлами превращения происходят при существенно более низких температурах, чем в кристаллическом фуллерене: “аморфный” фуллерен сохраняется в фуллерене без добавок и с добавками только после синтеза при 500°C, а при 800 и 1100°C уже наблюдается разориентированный графит. Таким образом, в аморфном состоянии фуллерен C₆₀ оказывается менее устойчивым, чем в кристаллическом состоянии. Это вполне понятный результат, поскольку “аморфный” фуллерен содержит много дефектов и имеет более высокую внутреннюю энергию. В случае фуллеренов C₆₀ и C₇₀ без металлических добавок такое влияние “аморфизации” методом механоактивации было исследовано раньше [8, 15], а для фуллерена с добавками металлов было показано в настоящей работе. Интересным является и то обстоятельство, что дефекты, вносимые механоактивацией в фуллерен при комнатной температуре, оказывают существенное влияние на фазовые превращения, проходящие при таких высоких температурах как 800 и 1100°C.

В целом, слабое изменение температур фазовых превращений в “аморфном” фуллерене C₆₀ при легировании есть результат действующих в противоположных направлениях двух факторов: повышения устойчивости фуллерена под действием добавок металлов и снижения этой устойчивости под действием его разориентировки. Воздействия этих двух факторов примерно равноценны.

В спектрах кристаллического фуллерена с железом наблюдаются четкие максимумы ОЦК-Fe (рис. 4), которые отсутствуют в спектрах разупорядоченного или почти завершившего кристаллизацию графита. Сохранение линий ОЦК-Fe может означать, что железо слабо взаимодействует с кристаллическим фуллереном C₆₀ и активно — с разориентированным графитом. Такой результат вполне логичен, так как в кристаллическом фуллерене все ковалентные связи насыщены, а в разориентированном графите имеется много оборванных связей, обуславливающих его высокую химическую активность. Этот вопрос так же, как образование карбидов при взаимодействии железа и алюминия с различными углеродными фазами, образующимися из фуллеренов при ВТВД, представляет интерес и требует дополнительного изучения.

Кристаллический фуллерен с добавками металлов, обладающий высокой термической устойчивостью при ВД и сохраняющий свою кристаллическую структуру при высоких температурах, все же несколько изменяется с температурой и давлением синтеза. Повышение давление несколько снижает температуру перехода кристаллического фуллерена в разориентированный графит (кристаллический фуллерен с железом при 1100°C, табл. 1).

Период ГЦК-решетки фуллерена уменьшается с увеличением давления и повышением температуры. На рис. 4 также видно, что при температуре синтеза 1100°C при $2\theta \sim 28^\circ$ в спектре кристаллического фуллерена появляется размытый дифракционный максимум, соответствующий линии (002) графита. Это показывает, что на стадии превращения кристаллического фуллерена C₆₀ в разориентированный графит эти две фазы могут сосуществовать.

Пока трудно предложить физическую модель, описывающую обнаруженное в настоящей работе сильное влияние металлов Al и Fe на фазовые превращения фуллерена C₆₀ при ВТВД. Наиболее распространенные модели расположения растворенных атомов — внутри или снаружи молекул фуллерена [17, 34] — трудно связать напрямую с термобарической устойчивостью фуллеренов. Возможно, важную роль для стабилизации молекул фуллерена играют поверхности на границе металлических и углеродных зерен.

АНИЗОТРОПИЯ ОБРАЗЦОВ

Ранее ультразвуковым и рентгеновским методами было показано [34, 35], что разориентированный графит, образующийся из фуллерена при высоких температурах и высоких давлениях, обладает анизотропией. Более информативным методом при исследовании анизотропии углеродных образцов является дифракция нейтронов. На продуктах превращения образцов “аморфного” и кристаллического фуллеренов C₇₀ было показано, что анизотропия разориентированного графита возникает не только из-за некоторой неоднородности распределения давления в образце-таблетке, но что степень анизотропии зависит также от типа исходной фазы фуллерена (кристаллический или “аморфный” фуллерен) и также изменяется с введением в “аморфный” фуллерен ~2 ат. % D [15], т.е. определенный вклад в анизотропию вносят особенности фазовых превращений фуллерена при ВТВД. Поэтому при исследовании влияния небольших концентраций металлов на фазовые превращения в фуллерене C₆₀ представляет интерес исследовать также анизотропию (рис. 5).

Анизотропия ГЦК-фуллерена C₆₀ проявляется в изменении относительных высот дифракционных максимумов или гало, расположенных при малых дифракционных углах — $2\theta \approx 11.5^\circ$ (111), $2\theta \approx 19.5^\circ$ (220) и $2\theta \approx 23^\circ$ (311). Относительное изменение высот дифракционных максимумов может быть связано с образованием текстуры. Кроме того, периоды кристаллической решетки, измеренные при направлении пучка нейтронов вдоль плоской поверхности кристаллического образца, оказываются на ~0.05 нм меньше, чем в случае прохожде-

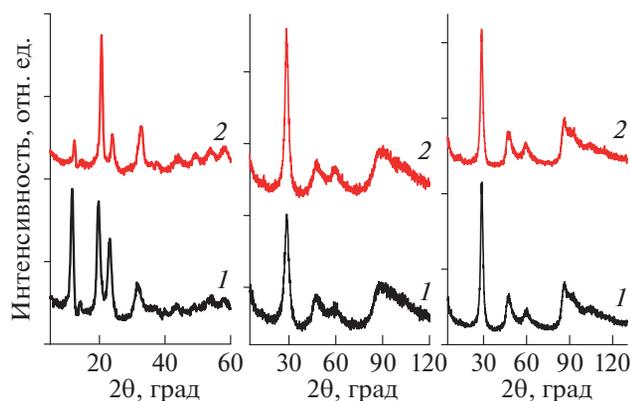


Рис. 5. Сравнение дифракционных нейтронных спектров образцов кристаллического фуллерена C_{60} , снятых при двух положениях образца относительно пучка нейтронов: 1 – поток нейтронов падает на плоскую поверхность образца-таблетки, 2 – на цилиндрическую поверхность. Слева – кристаллический фуллерен без металлов (с ГЦК-решеткой), синтезированный при 8 ГПа и 500°C; в центре – фуллерен без металлов со структурой аморфного графита, синтезированного при 8 ГПа и 800°C; справа – фуллерен с железом (7 ат. %) со структурой разориентированного графита, синтезированного при 8 ГПа и 1100°C.

ния пучка нейтронов перпендикулярно плоской поверхности. Это может быть признаком образования димеров [10, 11].

В отличие от разупорядоченного графита, образующегося при ВТВД из кристаллического или “аморфного” фуллерена C_{70} , в котором наблюдается сильная анизотропия [15], в разупорядоченном графите, образующемся при ВТВД из C_{60} , заметной анизотропии не наблюдали (рис. 5). Также не удалось установить существенного влияния металлических добавок на анизотропию как кристаллического фуллерена C_{60} , так и образующегося из фуллерена разупорядоченного графита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в “аморфный” и кристаллический фуллерен C_{60} алюминия и железа не изменяет известную температурную последовательность фазовых превращений при высоких температурах и высоких давлениях: кристаллический (или “аморфный”) фуллерен → разориентированный графит → кристаллический графит.

Введение в кристаллический фуллерен C_{60} алюминия и железа сильно повышает его термическую устойчивость и увеличивает температуру его превращения в разориентированный графит. В “аморфном” фуллерене подобный эффект не наблюдается из-за компенсации воздействия легирования снижением устойчивости фуллерена из-

за искажений, создаваемых предварительной механоактивацией.

Не обнаружено принципиальной разницы во влиянии Al и Fe на фазовые превращения в фуллерене C_{60} при высоких температурах и высоких давлениях.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 18-32-00262-мол_а (подготовка металлуглеродной смеси, исследования методом нейтронной дифракции). П.А. Борисова и М.С. Блантер благодарят РФФИ (проект № 19-02-00162-а – дифракционные исследования) и В.В. Бражкин благодарит РНФ (проект № 19-12-00111 – эксперименты при высоких давлениях) за финансовую поддержку настоящего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bakshi S.R., Lahiri D., Agarwal A. // *Int. Mater. Rev.* 2010. V. 55. P. 41.
2. Tjong S.C. // *Mater. Sci. Engin.* 2013. V. 74. P. 281.
3. Ojiyed T., Davaasambuu B.A. // *Sol. St. Phenom.* 2019. V. 288. P. 124.
4. Sizonenko O., Prokhorenko A., Torpakov A. et al. // *AIP Adv.* 2018. V. 8. Art. № 085317.
5. Shin J., Choi K., Shiko S. et al. // *Composites B.* 2015. V. 77. P. 194.
6. Chernogorova O., Drozdova E., Ovchinnikova I. et al. // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 111. Art. № 112601.
7. Turan M.E. // *J. Alloys Compounds.* 2019. V. 788. P. 352.
8. Borisova P.A., Blanter M.S., Brazhkin V.V. et al. // *J. Phys. Chem. Sol.* 2015. V. 83. P. 104.
9. Sundqvist B. // *Adv. Phys.* 1999. V. 48. P. 1.
10. Brazhkin V.V., Lyapin A.G. // *J. Superhard Mat.* 2012. V. 34. P. 400.
11. Brazhkin V.V., Lyapin A.G. // In: *Comprehensive hard materials.* Elsevier, 2014. P. 539.
12. Агафонов С.С., Глазков В.П., Кокин И.Ф. и др. // *ФТТ.* 2010. Т. 52. № 6. С. 1245; Agafonov S.S., Glazkov V.P., Kokin I.F. et al. // *Phys. Sol. St.* 2010. V. 52. P. 1329.
13. Verheijen M.A., Meekes H., Meijer G. et al. // *Chem. Phys.* 1992. V. 166. P. 287.
14. Blank V.V., Serebryanaya N.R., Dubitsky G.A. et al. // *Phys. Lett. A.* 1998. V. 248. P. 415.
15. Borisova P.A., Blanter M.S., Brazhkin V.V. et al. // *Diamond Rel. Mater.* 2018. V. 85. P. 74.
16. Cerón M.R., Maffei V., Stevenson S. et al. // *Inorg. Chem. Acta.* 2017. V. 468. P. 16.
17. Yang S., Wei T., Jin F. // *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. P. 5005.
18. Balch A.L., Winkler K. // *Chem. Rev.* 2016. V. 116. P. 3812.
19. Yang S., Wei T., Jin F. // *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. P. 5005.
20. De Silva T.N. // *Phys. Rev.* 2019. V. 100. Art. № 55106.
21. McClimon J. B., Monazami E., Reinke P. // *J. Phys. Chem. C.* 2014. V. 118. P. 24479.

22. Борисова П.А., Блантер М.С., Соменков В.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 11. С. 1478; *Borisova P.A., Blanter M.S., Somenkov V.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 11. P. 1205.
23. Ладьянов В.И., Никонова Р.М. Мерзлякова М.А. и др. // Персп. матер. 2010. № 9. С. 158.
24. Черногорова О.П., Дроздова Е.И., Блинов В.М. и др. // Росс. нанотехнол. 2008. Т. 3. № 5–6. С. 150.
25. Борисова П.А., Агафонов С.С., Блантер М.С. и др. // ФТТ. 2014. Т. 56. № 1. С. 194; *Borisova P.A., Agafonov S.S., Blanter M.S. et al.* // Phys. Sol. St. 2014. V. 56. P. 199.
26. *Borisova P.A., Blanter M.S., Brazhkin V.V. et al.* // J. Alloys. Compounds. 2016. V. 656. P. 383.
27. Борисова П.А., Блантер М.С., Бражкин В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 10. С. 1417.
28. Меньшиков А.З. Металловедение и термическая обработка стали. М: Металлургия, 1991. Т. 1. 276 с.
29. *Khvostantsev L.G., Slesarev V.N., Brazhkin V.V.* // High Pres. Res. 2004. V. 24. P. 371.
30. *Chernogorova O., Potapova I., Drozdova E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. Art. № 043110.
31. *Blank V.D., Buga S.G., Dubitsky N.R. et al.* // Carbon. 1998. V. 36. P. 319.
32. *Kolesnikov A.I., Antonov V.E., Bashkin O.I. et al.* // J. Phys. Cond. Mat. 1997. V. 9. P. 2831.
33. *Glazkov V.P., Naumov I.V., Somenkov V.A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 1988. V. A264. P. 367.
34. *Tai'yanin E.V., Lyapin A.G., Mukhamadiarov V.V. et al.* // J. Phys. Cond. Mater. 2005. V. 7. P. 256.
35. *Mukhamadiarov V.V., Vanin D.A., Lyapin A.G. et al.* // Fullerenes Nanotubes Carbon Nanostruct. 2006. V. 14. P. 409.