

В. Ф. Бритун, В. В. Ярош, А. В. Курдюмов,

А. И. Даниленко (г. Киев)

**britun@materials.kiev.ua*

Сравнительное исследование фазовых превращений в углероде при различных схемах ударного сжатия

Проведено сравнительное исследование фазовых превращений в углеграфитовых материалах при ударном сжатии по двум различным схемам: в цилиндрических ампулах с центральным стержнем при непосредственном контакте взрывчатых веществ с ампулой и в ампулах без стержня с метаемой внешней оболочкой. Установлено, что при ударном сжатии по второй схеме достигается более высокий абсолютный выход алмаза, но, в отличие от первой схемы, продукты ударного сжатия практически не содержат лонсдейлита или плотной аморфной фазы. Проведенный анализ показал, что во втором случае реализуются состояния с меньшими давлениями, но более высокими температурами, приводящими к превращению метастабильных фаз в стабильный алмаз.

Ключевые слова: ударное сжатие, ампула сохранения, графит, алмаз, фазовые превращения.

Существует ряд методов ударно-волнового синтеза фаз высокого давления углерода, образующихся в результате фазовых переходов. Наиболее изученным и, по-видимому, наиболее эффективным для синтеза алмаза и других сверхтвердых фаз является метод высокотемпературного ударного сжатия (ВТУС) порошков графита или сажи в цилиндрических ампулах сохранения (с центральным стержнем), находящихся в непосредственном контакте с зарядом взрывчатых веществ (ВВ) (далее ампула *ам1*) [1]. Особенностью метода ВТУС является использование добавок типа KCl, обладающих большей сжимаемостью и меньшей теплоемкостью, чем исходные углеграфитовые материалы (УГМ), благодаря чему при сжатии они нагреваются до более высоких температур, а при разгрузке резко охлаждаются, обеспечивая закалку образующихся фаз [1]. Использование метода ВТУС и ампул *ам1* позволило достичь выхода плотных фаз углерода до 60 % (по массе) при фазовых переходах графита [2] и до 90 % (по массе) – в результате превращений сажи [3]. Было установлено, что превращения протекают при давлении > 20 ГПа, причем из графита образуется смесь лонсдейлита с алмазом, а из сажи – смесь алмаза с плотной аморфной фазой $C_{ам}$.

Представляло интерес использовать метод ВТУС при ударном сжатии УГМ в ампулах сохранения другого типа (далее *ам2*) и сравнить результаты синтеза плотных фаз углерода в разных типах ампул. В качестве *ам2* в настоящей работе применили цилиндрическую ампулу сохранения без центрального стержня, особенностью которой является бесконтактная схема нагружения [1, 4]. Подобные ампулы успешно использовали для ударно-волнового синтеза сверхтвердых кубических фаз в системе В–С–N [5, 6]. При

этом в [5, 6], в отличие от добавок по методу ВТУС, использовали добавки, выполняющие только роль охладителей (для подавления высоких остаточных температур при разгрузке).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Схемы цилиндрических ампул *ам1* и *ам2* приведены на рис. 1. Исходными материалами для ударного сжатия в обеих ампулах были порошки природного графита С-1 и печной сажи ПМ-15, их структура подробно исследована в [2, 3]. В качестве добавки использовали порошок КСl (85 % (по массе)), плотности ρ_0 исходных порошковых смесей в обеих ампулах были приблизительно одинаковы и составляли $0,70 \pm 0,05$ и $1,4 \pm 0,05$ г/см³.

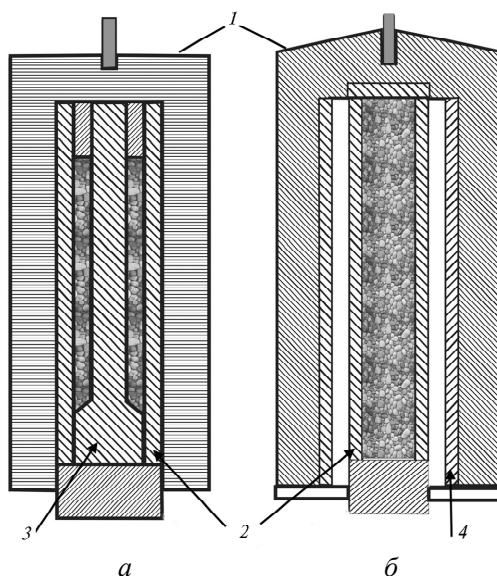


Рис. 1. Схематическое изображение ампул сохранения *ам1* (а) и *ам2* (б): 1 – заряд ВВ; 2 – цилиндрические ампулы с образцом; 3 – центральный стержень в *ам1*; 4 – метаемая оболочка в *ам2*.

Образцы после ВТУС и обогащения исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр HZG-4, излучение $\text{CuK}\alpha$) [2, 3]. На первом этапе (после ВТУС) определяли суммарный выход плотных фаз $V_{\text{пл}}$, % (по объему). Структуру остаточной графитоподобной фазы (ГФ), характеризующую шириной линии 002 (B_{002}) и степенью трехмерной упорядоченности P_3 , определяли по методике [7]. На втором этапе (после обогащения) определяли относительное содержание лонсдейлита ($V_{\text{л}}$) или плотной аморфной фазы углерода $S_{\text{ам}}$ ($V_{\text{ам}}$) в смесях с алмазом; эта методика описана в [2, 3]. Для каждого значения ρ_0 проводили не менее двух взрывных экспериментов, расхождение полученных результатов не превышало 10 % от измеренной величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рентгеновские дифрактограммы продуктов ударного сжатия графита и сажи, отмытые от КСl, приведены на рис. 2, результаты их анализа представлены в таблице. Рассмотрим вначале особенности структурных изменений ГФ при ВТУС в ампулах обоих типов. Из таблицы видно, что ударное сжатие

графита по обеим схемам приводит к снижению величины P_3 и увеличению V_{002} , причем степень разупорядочения структуры при меньшей исходной плотности выше. Структурные изменения сажи протекают в противоположном направлении: наблюдается упорядочение исходной турбостратной структуры, причем в образцах с меньшим значением ρ_0 этот процесс происходит более интенсивно. Наблюдаемые структурные изменения в ГФ являются следствием одновременного протекания процессов образования структурных дефектов при ударном сжатии и отжига дефектов под действием высоких температур. В случае сажи, очевидно, превалирует процесс отжига, причем более интенсивно он протекает в ампулах второго типа.

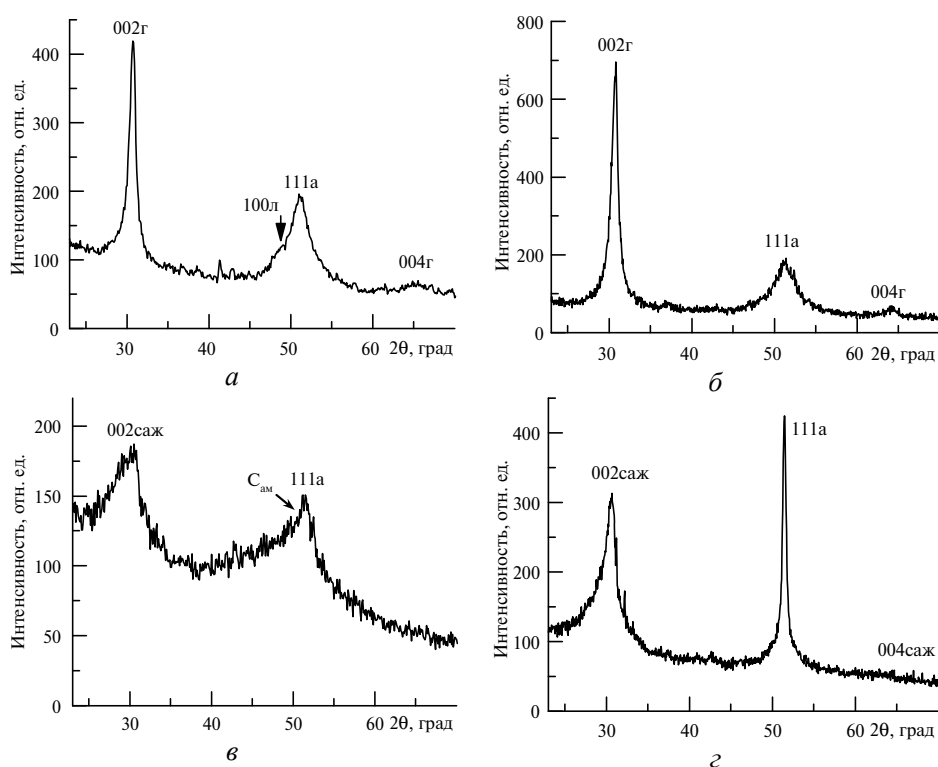


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы продуктов ударного сжатия графита (*а, б*) и сажи (*в, г*) в ампуле *ам1* (*а, в*) и *ам2* (*б, г*); $C_{ам}$ – плотная аморфная фаза углерода.

Выход плотных фаз ($V_{пл}$), определяемый степенью прямых фазовых превращений (и возможным обратным переходом при разгрузке), зависел как от схемы нагружения, так и от ρ_0 . Из таблицы видно, что в продуктах ударного сжатия графита в ампуле *ам1* плотные фазы наблюдаются при меньшей ρ_0 , а после сжатия в ампуле *ам2*, наоборот, – при большей ρ_0 .

Важным результатом настоящего исследования является установленная зависимость структуры образующихся плотных фаз от схемы ударно-волнового нагружения. В обогащенных образцах после ударного сжатия в ампулах типа *ам1* содержится более 50 % плотных метастабильных фаз углерода – лонсдейлита или $C_{ам}$ – тогда как после ударного сжатия по второй схеме (*ам2*) алмаз наблюдается почти в чистом виде. Наиболее вероятной причиной этого эффекта является превращение метастабильных фаз в стабильный при высоких давлениях алмаз.

Структурные характеристики и фазовый состав образцов графита и сажи после ударного сжатия и обогащения

Исходный УГМ	ρ_0 , г/см ³	Ампула							
		ам1				ам2			
		V_{002} , град	P_3	$V_{пл}$, % (по объему)	$V_{л, (V_{ам})}$, % (по объему)	V_{002} , град	P_3	$V_{пл}$, % (по объему)	$V_{л, (V_{ам})}$, % (по объему)
Графит	исходный	0,3	0,96	–	–	0,3	0,96	–	–
С-1	0,70	1,0	~ 0,5	50	55	1,3	~ 0,6	0	0
	1,4	0,5	~ 0,9	0	0	0,9	~ 0,7	23	< 10
Сажа	исходный	7,0	0	–	–	7,0	0	–	–
ПМ-15	0,70	3,5	не определено	70	(70)	1,3	0,6	0	0
	1,4	5,5	0	0	0	3,5	не определено	60	(< 10)

Примечание. В скобках приведены данные, относящиеся к аморфной фазе.

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ УДАРНОГО СЖАТИЯ В ДВУХ ТИПАХ АМПУЛ СОХРАНЕНИЯ

Для объяснения приведенных выше результатов по синтезу плотных фаз углерода проведем анализ условий ударного сжатия в использованных ампулах двух типов.

Для оценки этих условий вначале построим диаграмму давление–массовая скорость (рис. 3) и рассмотрим ударно-волновые процессы в ампулах. Отметим, что в ам1 генерирование ударной волны (УВ) происходит за счет детонации в слое ВВ, контактирующего со стенкой ампулы, а в ампуле ам2 генерирование УВ связано с ударом по стенке ампулы метаемой оболочки (ударником). Возникающая в стенке ампулы ам1 УВ имеет параметры, соответствующие координатам точки A^* , лежащей на пересечении ударной адиабаты материала ампулы (кривая 1) и кривой 2, представляющей зависимость давления от массовой скорости для продуктов детонации. Для различных ВВ, использованных в экспериментах, давление p^* обычно лежит в диапазоне 20–30 ГПа. Когда УВ достигает границы раздела ампулы и сжимаемого вещества, p , u -параметры первой УВ в веществе будут определяться координатами точки A_1 – точки пересечения кривой 3, представляющей зависимость $p(u)$ для отраженной от границы волны, идущей в стенке ампулы, и ударной адиабаты (кривая 4) сжимаемого вещества. Анализ этой схемы сжатия более детально описан в [1, 8]. Здесь же лишь отметим, что, пока на внешней стенке ампулы поддерживается высокое давление продуктами детонации, в веществе, находящимся в зазоре между стенкой ампулы и центральным стержнем проходит несколько отраженных УВ (отражения происходят между стенкой ампулы и стержнем), при этом давление в веществе постепенно поднимается и достигает величины $\sim p^*$. Процесс увеличения давления схематично показан на диаграмме пунктирными линиями 5 (каждая из которых представляет ударную адиабату сжимаемого вещества с начальной плотностью, соответствующей началу прохождения очередной УВ).

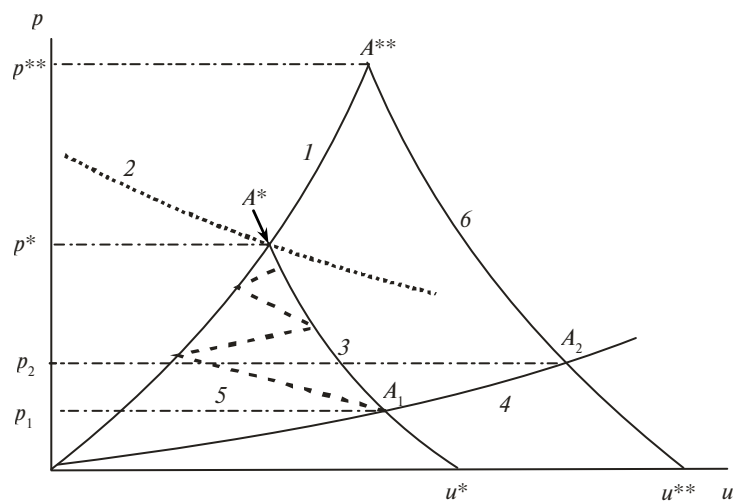


Рис. 3. Диаграмма давление–массовая скорость: ударная адиабата стали (1) и сжимаемого образца (4, 5), зависимость $p(u)$ для волн в продуктах детонации (2) и отраженных в стенке ампулы (3, 6).

Для анализа сжатия в ам2 рассмотрим на диаграмме кривую состояний в волне разгрузки в стали (кривая б). Предположим, что ударник и стенка – плоские. Особенности построения $p(u)$ -диаграммы при генерировании ударных волн метанием ударника рассмотрены в [9]. В момент удара метаемой оболочки, летящей со скоростью u^{**} , в стенке ампулы возникает ударная волна, а в ударнике – отраженная. Параметры этих волн определяет точка A^{**} . Когда ударная волна в стенке ампулы достигает границы стенка–образец, в стенке ампулы возникает отраженная волна, а в образце – ударная. Параметры этой волны определяются точкой пересечения ударной адиабаты образца и кривой б (точка A_2). Если образцом является высокоупорядоченный беспористый графит, то давление p_2 , по данным [9, 10], должно быть не менее 20 ГПа для начала фазового превращения (ФП) или ~ 33 ГПа для полного его завершения, а скорость u^{**} должна лежать в области 2–2,8 км/с (если стенка ампулы и ударник сделаны из стали). Оценку давлений в порошковом объекте проведем для $u^{**} = 2,4$ км/с. Поскольку для сохранения продуктов ФП в экспериментах использовали смесь углеграфитового порошка и порошка КС1, причем количество последнего было 85–90 % (по массе), то p, T -условия сжатия в основном определяются ударной адиабатой порошка КС1, поэтому дальнейшие оценки проводили для чистого КС1. Заметим, что полученные при этом оценочные значения p, T -параметров сжатия отличаются от параметров сжатия реальных смесей небольшим смещением в область более низких температур. Оценки показали, что при одинаковых (2,4 км/с) скоростях ударника в плотном графите возникает УВ с давлением ~ 25 ГПа, в порошке КС1 с плотностью $0,7$ г/см³ – УВ с давлением ~ 6 ГПа, а в порошке с плотностью $1,4$ г/см³ – УВ с давлением 14–15 ГПа. Для оценки температуры ударного сжатия таких порошков использовали ударные адиабаты КС1 с теоретической плотностью и ударные адиабаты порошков в координатах давление–удельный объем. По литературным данным, при сжатии монокристалла КС1 ударной волной с давлением 30 ГПа температура поднимается до 3200–3500 К [11]. Используя эту величину в качестве параметра и сравнивая площади под ударными адиабатами, получим для ударного сжатия в порошке

$am2$ плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ температуру $T_{0,7} = 4700\text{--}5000 \text{ К}$, в порошке с плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$ – $T_{1,4} = 4200\text{--}4500 \text{ К}$ (оценки сделаны без учета плавления соли). Ранее авторы оценивали температуру сжатия в $am1$ [1, 8] и для порошка KCl с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ получили значения температуры в диапазоне $3500\text{--}4000 \text{ К}$. Аналогичная процедура оценки для порошка плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$ дает температуру $1700\text{--}1900 \text{ К}$.

Рассмотрим p, T -диаграмму вещества при его ударном сжатии в различных ампулах сохранения (рис. 4).

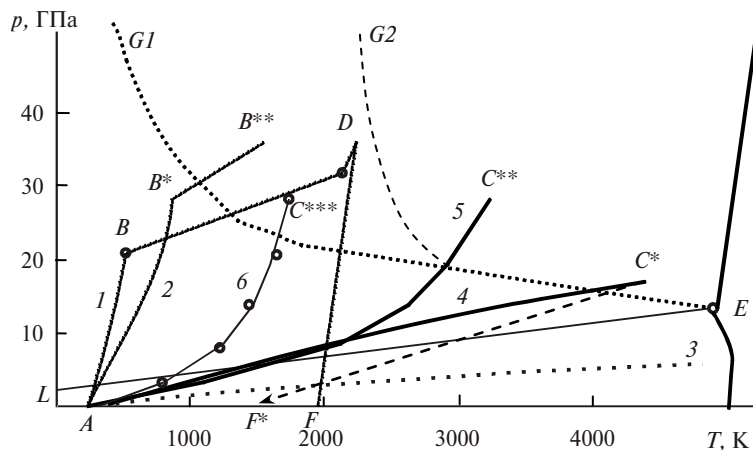


Рис. 4. Диаграмма давление–температура: линия равновесия графит–алмаз (LE), барьер ($G1$), выше которого наблюдаются прямые превращения в статике [13], условный барьер ($G2$), разделяющий области образования метастабильных фаз (слева) и алмаза (справа), состояния, возникающие при ударном сжатии высокоупорядоченного и слабоупорядоченного графита (1, 2) [10], состояние вещества при ударном сжатии в ампулах $am2$ (3, 4), и $am1$ (5, 6).

Как было отмечено выше, начало ФП беспористого высокоупорядоченного графита в алмаз при ударном сжатии начинается при давлении $> 20 \text{ ГПа}$, а завершается при давлении $\sim 33 \text{ ГПа}$ [9, 10]. Этот процесс на p, T -диаграмме (при сжатии вещества одной УВ) показан линией 1, где участок AB соответствует сжатию графита, BC – превращению в плотную фазу, CD – сжатию алмаза, DF – разгрузке алмаза. После разгрузки образовавшийся алмаз имеет высокую остаточную температуру (точка F) и превращается в графит. Кроме этой линии на диаграмме приведена линия 2 – AB^*B^{**} , построенная по данным [10], которая показывает, что при наличии дефектности и слабого разупорядочения исходного графита давление и температура начала превращения могут заметно повышаться (точка B^* находится выше и правее точки B). На диаграмме показаны также линия равновесия графит–алмаз (LE), линия $G1$, выше которой находятся все известные экспериментальные точки для p, T -условий образования плотных фаз [12, 13] (эта линия также рассматривается как линия силового барьера прямого перехода графит–алмаз [13]). Линия $G2$, приведенная на диаграмме, по данным [12], делит область стабильности фаз высокого давления на две части: справа от этой линии находится только кубический алмаз, а слева, при сжатии, – лонсдейлит, т. е. справа находится область, в которой скорость диффузионных процессов очень велика.

Рассмотрим на p, T -диаграмме кривые, характеризующие состояния, которые возможны при ударном сжатии KCl . Сначала рассмотрим однократное сжатие (т. е. сжатия в $am2$) порошков KCl с разными плотностями (кривые 3

и 4, которые фактически представляют отрезки ударных адиабат в p, T -координатах). Как видно, при сжатии порошка с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ (кривая 3) параметры процесса находятся в области ниже линии равновесия LE и алмаз образоваться не может. При сжатии порошков с плотностью $\sim 1,4 \text{ г/см}^3$ (кривая 4) параметры попадают в область стабильности алмаза; при этом точка C^* находится над силовым барьером и образование плотной фазы может протекать достаточно быстро. Однако высокая температура ударного сжатия, характерная для этого случая, может вызвать проблемы охлаждения продуктов сжатия и их сохранения, так как давление, соответствующее точке C^* , недостаточно высокое, а эффективность охлаждающего действия добавки определяется ее степенью сжатия, т. е. требует сжатия до высоких давлений. Экспериментальные данные, однако, показывают, что после разгрузки продукты ударного сжатия находятся в состоянии, в котором фазы высокого давления частично сохраняются – область точки F^* . Отметим, что при увеличении скорости метания оболочки точка C^* поднимается и вместе с этим сдвигается вправо, а при увеличении доли графита в сжимаемой смеси точка C^* сдвигается влево; последнее несколько улучшает условия образования и сохранения плотной фазы.

Далее сравним процесс однократного сжатия в $am2$ с процессом многоволнового сжатия в $am1$. Для этого на диаграмме построим линии, отвечающие увеличению давления и температуры при многоволновом сжатии, когда в образце последовательно проходят ударные волны, постепенно поднимая давление и температуру. Эти процессы рассмотрены в [1, 8]. На диаграмме приведены две кривые (5 и 6), описывающие возможные состояния вещества при сжатии: кривая 5 соответствует сжатию порошка КС1 с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$, а кривая 6 – порошка с плотностью $\sim 1,4 \text{ г/см}^3$. Видно что при сжатии порошка с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ точка C^{**} оказывается в области образования кубического алмаза при $p = 30 \text{ ГПа}$. При снижении давления до 20 ГПа конечная точка C^{**} окажется ниже барьера быстрого ФП и выход плотных фаз может снизиться до нуля несмотря на достаточно высокую температуру. Кроме того, можно отметить, что при снижении доли КС1 в сжимаемой смеси температура ударного сжатия понижается (точка C^{**} перемещается к линии $G2$ и может оказаться левее этой линии, т. е. в области, где заторможены диффузионные процессы). Кривая 6, описывающая возможные состояния порошка с плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, оказывается левее линии $G2$, т. е. в области, в которой можно ожидать протекания только мартенситных превращений графит–лонсдейлит в высокоупорядоченном исходном графите. Отметим, что при этом ФП можно ожидать только в случае, когда точка C^{***} оказывается вблизи линии BC или выше этой линии. В случае, если давление, соответствующее точке C^{***} , приближается к 20 ГПа (точка C^{***} опускается ниже линии GI), превращение может вообще не начаться (как для высокоупорядоченных, так и для разупорядоченных графитов). Здесь следует сделать еще одно замечание. Состояния, соответствующие линии ABC , возникают при сжатии высокоупорядоченного графита одной УВ, а состояние, соответствующее точке C^{***} , возникает после прохождения в сжимаемом веществе нескольких УВ, поэтому при сжатии в $am1$ исходный высокоупорядоченный графит на последнем этапе (перед точкой C^{***}) уже оказывается несколько разупорядоченным и условия его превращения уже не соответствуют линии BC , а могут лежать значительно выше ее (например, на линии BB^*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ p , T -состояний, реализуемых в использованных ампулах сохранения, позволяет объяснить результаты экспериментов следующим образом.

При использовании ампул $am1$ эффективное образование плотных фаз в случае использования исходных порошков с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ обусловлено тем, что достигаемое состояние (точка C^{**}) лежит в области правее линии $G2$, т. е. в области быстропротекающих процессов превращения ГФ в плотные фазы. При этом ФП может эффективно протекать как в графите, так и в саже, а охлаждение продуктов ударного сжатия проходит достаточно эффективно, поскольку точка C^{**} не слишком сдвинута в область высоких температур. Причину высокого содержания в продуктах сжатия метастабильных фаз ($C_{ам}$ или лонсдейлита) можно объяснить тем, что поскольку сжатию подвергается смесь КС1 + УГМ, реальное положение точки C^{**} для смеси находится вблизи линии $G2$. Заметим, что сама линия $G2$ проведена достаточно условно и скорее представляет полосу, размытую вдоль оси T . Учитывая это, а также тот факт, что в цилиндрических ампулах распределение p , T -параметров по объему неоднородно, можно полагать, что часть УГМ при сжатии находится в условиях интенсивных диффузионных превращений, а часть – на полосе $G2$ и, возможно, левее, т. е. в условиях заторможенных диффузионных процессов, и эта часть УГМ превращается в метастабильные фазы. В случае исходного порошка с $\rho_0 = 1,4 \text{ г/см}^3$ p , T -условия таковы, что сажа не будет превращаться в плотные фазы, так как $T_{уд}$ слишком низкая (точка C^{***} лежит значительно левее линии $G2$), а графит не превращается в алмаз или лонсдейлит из-за того, что точка C^{***} находится значительно ниже линии B^*B^{**} . Именно последнюю, вероятно, следует рассматривать как барьер, выше которого развивается бездиффузионный переход.

В ампулах $am2$ образование плотных фаз из исходных порошков с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$ не обнаружено, поскольку при сжатии таких порошков достигаемое состояние лежит в области стабильности ГФ и ФП не протекают. При сжатии порошков с исходной плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$ превращения УГМ в плотные фазы происходят при температурах, значительно более высоких, чем температуры, достигаемые в $am1$. В этом случае достигаемые p , T -состояния лежат глубоко в области диффузионных процессов, поэтому даже если на начальных этапах ФП образуются метастабильные фазы, они успевают превратиться в стабильный алмаз. Более низкий выход плотных фаз, фиксируемый при этом, можно объяснить более низкой эффективностью процессов охлаждения (охлаждение системы из точки C^* за счет расширения КС1 менее эффективно, чем из точки C^{**} , так как для последней характерна более высокая степень сжатия и более низкая $T_{уд}$).

Результаты проведенного исследования показали более высокую эффективность использования ампул $am1$ по сравнению с ампулами $am2$ при получении плотных фаз из графита. При синтезе плотных фаз из сажи ампулы $am2$ могут оказаться более эффективными, поскольку позволяют сжимать значительно больший объем УГМ. Следует также отметить, что получать метастабильные фазы с достаточно высоким выходом удастся только в ампулах $am1$, поскольку в ампулах $am2$ практически не удастся реализовать процесс сжатия до состояний, параметры которых находятся левее $G2$, но выше $G1$, обеспечив при этом и эффективную закалку фаз высокого давления.

Проведено порівняльне дослідження фазових перетворень у вуглеграфітових матеріалах при ударному стисненні за двома різними схемами: в циліндричних ампулах з центральним стрижнем при безпосередньому контакті взривних речовин з ампулою та в ампулах без стрижня з зовнішньою оболонкою, що метається. Установлено, що при ударному стисненні за другою схемою досягається більш високий абсолютний вихід алмазу, але, на відміну від першої схеми, продукти ударного стиснення практично не містять лонсдейліту чи щільної аморфної фази. Проведений аналіз показав, що в другому випадку реалізуються стани з меншими тисками, але більш високими температурами, що приводять до перетворення метастабільних фаз в стабільний алмаз.

Ключові слова: ударне стиснення, ампула збереження, графіт, алмаз, фазові перетворення.

A comparative study of phase transformations in carbon materials under shock compression was carried out. Two methods were used for shock wave (SW) generation. In the first case ampoules with central rod were used and the SW was generated by explosive being in contact with the ampoule. In the second one the ampoules without central rod were used and SW excited by the impact of metal shell to the ampoule. It was revealed that the pressure was higher while the temperature was lower in ampoules №1 compared with those for ampoules №2. Compression conditions in ampoules №1 provide higher fractional conversion and more favorable for preservation of high pressure phases. Metastable lonsdaleite and dense amorphous carbon phases were obtained in this type of ampoules where the amount of these phases was over than ~50 %. While in the ampoules №2 the stable cubic diamond phase was mainly formed since the temperature was noticeably higher compared with that in the first type ampoules.

Keywords: shock compressio, recovered ampoule, diamond, graphite, phase transformation.

1. Курдюмов А. В., Бритун В. Ф., Боримчук Н. И., Ярош В. В. Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии. – К.: Изд-во Курдюмова, 2005. – 191 с.
2. Курдюмов А. В., Бритун В. Ф., Ярош В. В. и др. Влияние условий ударного сжатия на превращения графита в лонсдейлит и алмаз // Сверхтв. материалы. – 2012. – № 1. – С. 27–37.
3. Курдюмов А. В., Бритун В. Ф., Ярош В. В. и др. Фазовые превращения сажи при высокотемпературном ударном сжатии // Там же. – 2009. – № 5. – С. 36–43.
4. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. – М.: Энергоатом, 2003. – 272 с.
5. Komatsu T., Nomura M., Kakudate J., Fujiwara S. Synthesis and characterization of a shock-synthesized cubic B–N–C solid solution of composition BC_{2,5}N // J. Mater. Chem. – 1996. – 6, N 11. – P. 1799–1803.
6. Kakudate J., Yoshida M., Usuba S. et al. Shock synthesis of a hybrid of diamond and cubic boron nitride // Adv. Mater. – 1993. – N 1. – P. 1447–1450.
7. Курдюмов А. В. О дефектах упаковки в графитоподобном нитриде бора // Кристаллография. – 1975. – 20, вып. 5. – С. 969–973.
8. Бритун В. Ф., Курдюмов А. В., Боримчук Н. И., Ярош В. В. Оценка *p*, *T*-условий, реалізуємих при высокотемпературному ударному сжатии нитрида бора в циліндричеській ампуле збереження // Фізика і техніка високих давлєнь. – 2005. – 15, № 3. – С. 71–83.
9. Ломоносов И. В., Фортвов В. Е., Фролова А. А. и др. Численное исследование ударного сжатия графита и его превращений в алмаз в конических мишенях // Журнал технической физики. – 2003. – 73, № 6. – С. 66–75.
10. Erskine D. J., Nellis W. J. Shock induced martensitic transformation of highly oriented graphite to diamond // J. Appl. Phys. – 1992. – 71, N 10. – P. 4882–4886.
11. Кормер С. Б., Синицин М. В., Кириллов Г. А., Урлин В. Д. Экспериментальное определение температур ударно сжатых NaCl и KCl и их кривых плавления до давлений 700 кбар // ЖЭТФ. – 1965. – 48, № 4. – С. 1033–1048.
12. Bundy F. P., Bassett W. A., Weathers M. S. et al. The pressure-temperature phase and transformation diagram for carbon; updated through 1994 // Carbon. – 1996. – 34, N 2. – P. 141–153.
13. Андреев В. Д., Малик В. П. Изотермическое сжатие углерода в системе графит–алмаз в диапазоне температур 0–4000 К // Сверхтв. материалы. – 1987. – № 5. – С. 23–26.

Ин-т проблем матеріалознавства
ім. І. Н. Францевича НАН України

Поступила 02.06.14