

PACS: 62.50.+p

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

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ НА ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В УГЛЕРОДЕ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

Статья поступила в редакцию 5 мая 2014 года

Проведено сравнительное исследование фазовых превращений в углеграфитовых материалах (УГМ) при ударном сжатии по двум различным схемам: 1) в цилиндрических ампулах с центральным стержнем при непосредственном контакте взрывчатого вещества с ампулой и 2) в ампулах без стержня с металлической 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. 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, схема нагружения, графит, алмаз, фазовые превращения

Проведено порівняльне дослідження фазових перетворень у вуглеграфітових матеріалах (ВГМ) при ударному стисненні за двома різними схемами: 1) у циліндричних ампулах з центральним стрижнем при безпосередньому контакті вибухової речовини з ампулою та 2) в ампулах без стрижня із зовнішньою оболонкою, що метастає. Встановлено, 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 або щільної аморфної фази. Аналіз показав, що в другому випадку реалізуються стани з меншими тисками, але більш високими температурами, які призводять до перетворення метастабільних фаз у стабільний алмаз.

Ключові слова: ударне стиснення, схема навантаження, графіт, алмаз, фазові перетворення

Изучению фазовых превращений в углероде при ударном сжатии посвящено достаточно много работ [1]. В большинстве из них ударное воздействие на образцы осуществляли с использованием плоской ударной волны, при этом фазы высокого давления обычно не сохранялись. Эксперименты с сохранением (закалкой) фаз высокого давления при динамическом воздействии на УГМ проводили в цилиндрических ампулах сохранения.

Так, в работах [2,3] исследовали превращения графита и сажи при ударном сжатии порошков в цилиндрических ампулах сохранения с центральным стержнем (далее – *ам1*), при этом генерирование ударной волны происходило за счет детонации в слое взрывчатого вещества, контактирующего со стенкой ампулы. Особенностью указанных экспериментов является ударное сжатие смесей УГМ с KCl. Используемая соль обладает большей сжимаемостью, чем исходные УГМ и фазы высокого давления углерода, благодаря чему при сжатии смесь сильнее разогревается, а при разгрузке продукты ударного сжатия резко охлаждаются, что и обеспечивает закалку образующихся фаз [1]. Метод получил название высокотемпературного ударного сжатия (ВТУС) [1–3]. Сжатие смесей УГМ с KCl в *ам1* позволило достичь выхода плотных фаз углерода до 60 mass% при фазовых переходах графита [2] и до 90 mass% – в результате превращений сажи [3]. Было установлено, что из графита образуется смесь лонсдейлита с алмазом, а из сажи – смесь алмаза с плотной аморфной фазой C_{am} .

Целью настоящей работы было проведение экспериментов по ударному сжатию графита и сажи (с добавками KCl) в ампулах сохранения другого типа (далее – *ам2*). В качестве *ам2* мы применили цилиндрическую ампулу сохранения без центрального стержня, генерирование ударной волны в которой проводилось ударом по стенке ампулы метаемой оболочки [1,4]. Подобные ампулы использовались для ударно-волнового синтеза сверхтвердых кубических фаз в системе B–C–N [5,6]. Представляло интерес сравнить результаты синтеза плотных фаз углерода при сжатии порошковых смесей в двух типах ампул, поскольку в *ам1* повышение давления и температуры происходит постепенно за счет прохождения нескольких ударных волн между центральным стержнем и стенкой ампулы, а в *ам2* сжатие однократное [1]. В работе проведен сравнительный анализ термобарических условий, при которых протекают фазовые превращения УГМ в использованных ампулах.

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 KCl (85 mass%); плотности исходных порошковых смесей ρ_0 в *ам1* и *ам2* были приблизительно одинаковы и составляли 0.70 ± 0.05 и 1.4 ± 0.05 g/cm³ соответственно.

Образцы после ударного сжатия и обогащения исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр HZG-4, Cu K_{α} -излучение) [2,3]. До обогащения определяли суммарный выход плотных фаз V_{dens} (в объемных %). Структуру остаточной графитоподобной фазы характеризовали шириной линии 002 (B_{002}) и степенью трехмерной упорядоченности P_3 ,

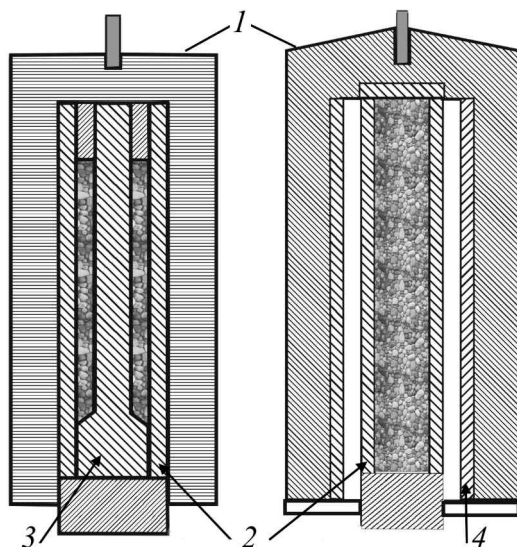


Рис. 1. Схематическое изображение ампул сохранения *ам1* и *ам2*: 1 – заряд взрывчатого вещества, 2 – цилиндрические ампулы с образцом, 3 – центральный стержень в *ам1*, 4 – метаемаю оболочка в *ам2*

найденной по методике [7]. На втором этапе (после обогащения) определяли относительное содержание в смесях с алмазом лонсдейлита $V_{\text{лон}}$ или аморфной фазы углерода $V_{\text{ам}}$; эта методика также описана в [2,3]. При каждом значении ρ_0 проводили не менее двух взрывных экспериментов, расхождение полученных результатов не превышало 10% от измеренной величины.

Результаты экспериментов

Рентгеновские дифрактограммы продуктов ударного сжатия графита и сажи, отмытых от КСl, приведены на рис. 2, результаты их анализа даны в таблице. Рассмотрим вначале особенности структурных изменений графитоподобных фаз при ВТУС в ампулах обоих типов. Из таблицы видно, что ударное сжатие графита по обеим схемам приводит к снижению P_3 и увеличению B_{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 графитоподобных фазах 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 *ам2*.

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

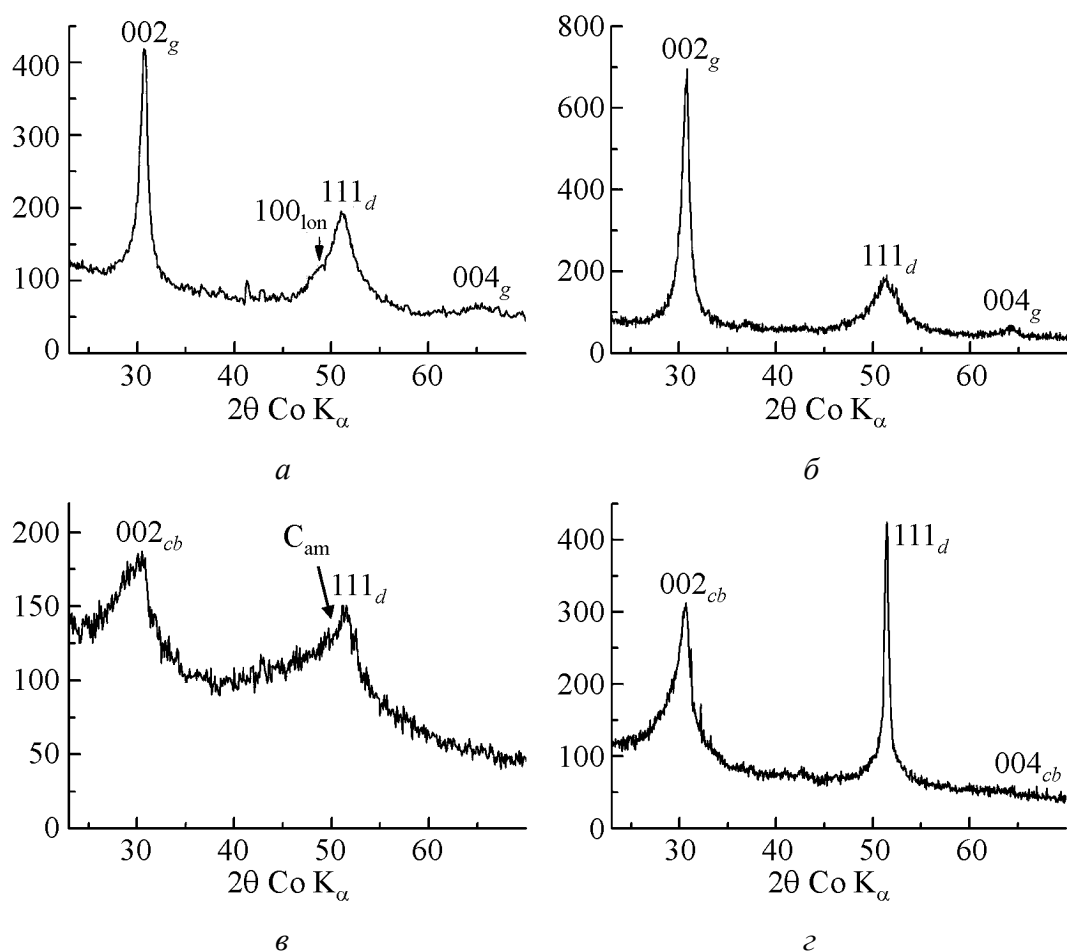


Рис. 2. Рентгеновские диффрактограммы продуктов ударного сжатия графита (а, б) и сажи (в, з) в ам1 (слева) и ам2 (справа). Индексы g и cb соответствуют графиту и саже, индексы lon и d – лондейлиту и алмазу; Cam – плотная аморфная фаза углерода

Таблица

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

Исходный УГМ	$\rho_0, \text{g/cm}^3$	ам1				ам2			
		B_{002}, deg	P_3	$V_{\text{dens}}, \text{vol.}\%$	$V_{\text{lon}} (V_{\text{am}}), \text{vol.}\%$	B_{002}^0, deg	P_3	$V_{\text{dens}}, \text{vol.}\%$	$V_{\text{lon}} (V_{\text{am}}), \text{vol.}\%$
Графит С-1	Исходный порошок	0.3	0.96	–	–	0.3	0.96	–	–
	0.70	1.0	≈ 0.5	50	55	1.3	≈ 0.6	0	0
	1.35	0.5	≈ 0.9	0	0	0.9	≈ 0.7	23	< 10
Сажа ПМ-15	Исходный порошок	7.0	0	–	–	7.0	0	–	–
	0.70	3.5	Не опр.	70	(70)	1.3	0.6	0	0
	1.35	5.5	0	0	0	3.5	Не опр.	60	(< 10)

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

Анализ условий ударного сжатия в двух типах ампул сохранения

С целью объяснения приведенных выше результатов по синтезу плотных фаз углерода проведем анализ условий ударного сжатия в использованных ампулах двух видов. Для оценки этих условий сначала построим диаграмму давление P –массовая скорость u (рис. 3) и рассмотрим ударно-волновые процессы в ампулах.

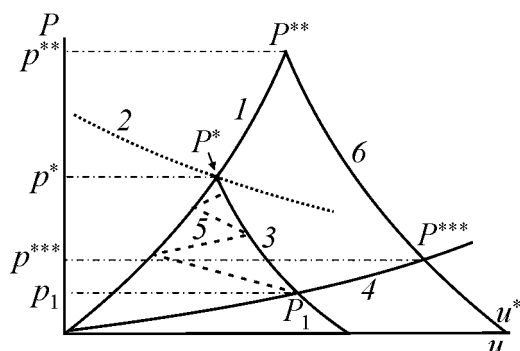


Рис. 3. Диаграмма зависимости давления от массовой скорости для анализа процессов в *ам1* и *ам2*: 1 – ударная адиабата стали; 2 – $P(u)$ -зависимость для продуктов детонации; 3, 6 – $P(u)$ -зависимости для отраженных волн в стенке ампулы; 4, 5 – ударные адиабаты сжимаемого образца

В *ам1* возникающая в стенке ампулы ударная волна имеет параметры, соответствующие координатам точки P^* , лежащей на пересечении ударной адиабаты материала ампулы (кривая 1) и кривой 2, представляющей зависимость давления от массовой скорости для продуктов детонации $P(u)$. Для различных взрывчатых веществ, использованных в наших экспериментах, давление P^* обычно лежит в диапазоне 2–30 ГПа. Когда ударная волна достигает границы раздела ампулы и сжимаемого вещества, параметры P , u первой волны в веществе определяются координатами точки P_1 – точки пересечения кривой 3 (представляющей зависимость $P_c(u)$ для отраженной от границы волны, идущей в стенке ампулы) и ударной адиабаты (кривая 4) сжимаемого вещества. Анализ этой схемы сжатия более детально описан в работах [1,8]. Здесь же мы лишь отметим, что пока на внешней стенке ампулы поддерживается высокое давление продуктами детонации, в веществе, находящемся в зазоре между стенкой ампулы и центральным стержнем, проходит несколько отраженных ударных волн (отражения происходят между стенкой ампулы и стержнем). При этом давление в веществе постепенно поднимается и достигает величины $\approx P^*$. Процесс повышения давления схематично показан на диаграмме пунктирными линиями 5 (каж-

дая из которых представляет ударную адиабату сжимаемого вещества с начальной плотностью, соответствующей началу прохождения очередной ударной волны).

Для анализа случая сжатия в *ам2* изобразим на диаграмме кривую состояний в волне разгрузки в стали как кривую *б*. Рассмотрение проводим в предположении о том, что ударник и стенка плоские. Особенности построения $P(u)$ -диаграммы для случая генерирования ударных волн метанием ударников 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 P^{**} . Когда ударная волна в стенке ампулы достигает границы стенка–образец, в стенке ампулы появляется отраженная волна, а в образце – ударная. Параметры этой волны определяются точкой пересечения ударной адиабаты образца и кривой *б* (точка P^{***}).

В случае, когда образцом является высокоупорядоченный беспористый графит, давление P^{***} , по литературным данным [10,11], должно быть не менее 20 GPa для начала фазового превращения или ~ 33 GPa для полного завершения превращения. Для этих случаев скорость u^* должна лежать в области 2–2.8 km/s (если стенка ампулы и ударник стальные). Оценки давлений в порошковом объекте проводим для $u^* = 2.4$ km/s. Поскольку для сохранения продуктов фазовых переходов в наших экспериментах используется смесь углеродистого порошка и порошка KCl (причем последний берется в количестве 85–90%), P , T -условия сжатия в основном определяются ударной адиабатой порошка KCl, поэтому дальнейшие оценки проводятся для чистого KCl. (Заметим, что полученные при этом оценочные значения параметров сжатия P , T отличаются от параметров сжатия реальных смесей небольшим смещением в область более низких температур.)

Оценки показали, что при одинаковых скоростях ударника (2.4 km/s) в плотном графите возникает ударная волна с давлением ~ 25 GPa, в порошке KCl с $\rho_0 = 0.7$ g/cm³ – волна с давлением ~ 6 GPa, а в случае порошка с $\rho_0 = 1.4$ g/cm³ – волна с давлением 14–15 GPa. Для оценок температуры ударного сжатия таких порошков используем ударные адиабаты KCl с теоретической плотностью и ударные адиабаты порошков в координатах давление–удельный объем. По литературным данным, при сжатии монокристалла KCl ударной волной с давлением 30 GPa температура поднимается до 3200–3500 K [12]. Взяв эту величину в качестве параметра при ВТУС в *ам2*, получим (сравнением площадей под ударными адиабатами) для порошка с $\rho_0 = 0.7$ g/cm³ $T_{0.7} = 4700–5000$ K, а для порошка с $\rho_0 = 1.4$ g/cm³ $T_{1.4} = 4200–4500$ K (оценки сделаны без учета плавления соли). Ранее мы оценивали температуры сжатия в *ам1* [1,8] и для порошка KCl с $\rho_0 = 0.7$ g/cm³ получили $T \sim 3500–4000$ K. Аналогичная процедура оценки для порошка с $\rho_0 = 1.4$ g/cm³ дает $T \sim 1700–1900$ K.

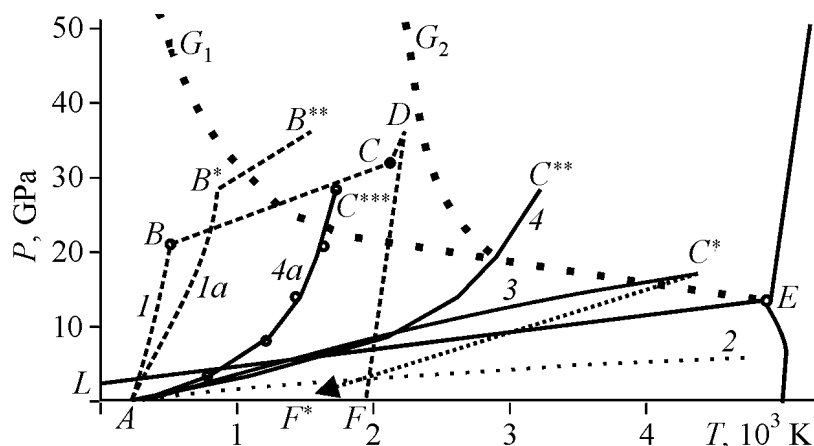


Рис. 4. Диаграмма давление–температура для анализа состояний образцов, возникающих при ударном сжатии: LE – линия равновесия графит–алмаз; G_1 – барьер, выше которого наблюдаются прямые превращения в статике [13]; G_2 – условный барьер, разделяющий области образования метастабильных фаз (слева) и алмаза (справа); I и Ia – состояния, возникающие при ударном сжатии высокоупорядоченного и слабоупорядоченного графита [10]; 2 и 3 – состояния вещества при ударном сжатии в $am2$; 4 и $4a$ – в $am1$

Рассмотрим теперь достигаемые P , T -состояния вещества при его ударном сжатии в различных ампулах на P – T -диаграмме (рис. 4). Мы уже отмечали, что, по литературным данным, начало фазового превращения беспорядочного высокоупорядоченного графита в алмаз начинается при $P > 20$ GPa, а завершается при $P \sim 33$ GPa [10]. Этот процесс на P – T -диаграмме (при сжатии вещества одной ударной волной) показан линией I , где участок AB соответствует сжатию графита, участок BC – превращению в плотную фазу, CD – сжатию алмаза и DF – разгрузке алмаза. После разгрузки образовавшийся алмаз имеет высокую остаточную температуру (точка F) и не сохраняется. Кроме того, на диаграмме приведена линия AB^*B^{**} , построенная по данным работы [10]. Эта линия 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 приведены также линия равновесия графит–алмаз (LE) и линия G_1 , выше которой находятся все известные экспериментальные точки P , T -условий образования плотных фаз [13,14] (эта линия также рассматривается как линия силового барьера прямого перехода графит–алмаз [14]). Линия G_2 , представленная на диаграмме по данным [13], делит область стабильности фаз высокого давления на две части: справа от линии обнаруживается только кубический алмаз, а лонсдейлит обнаруживается только при сжатии, когда параметры находятся слева от линии, т.е. справа находится область, в которой очень высока скорость диффузионных процессов.

Теперь рассмотрим на P – T -диаграмме кривые, характеризующие состояния, которые возможны при ударном сжатии KCl. Сначала оценим одно-

кратное сжатие (т.е. сжатие в $am2$) порошков KCl с разными плотностями (кривые 2 и 3, которые фактически представляют отрезки ударных адиабат в P, T -координатах). Как видно, при сжатии порошка с $\rho_0 = 0.7 \text{ g/cm}^3$ (кривая 2) мы не поднимаемся выше линии равновесия LE , и алмаз образоваться не может. При сжатии порошков с $\rho_0 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ (кривая 3) мы попадаем в область стабильности алмаза; при этом точка C^* находится над силовым барьером, и процессы образования плотной фазы могут протекать достаточно быстро. Но высокая температура ударного сжатия $T_{sh.c}$, характерная для данного случая, может вызвать проблемы охлаждения продуктов сжатия и их сохранения, так как давление, соответствующее точке C^* , недостаточно высоко, а эффективность охлаждающего действия добавки определяется степенью ее сжатия, т.е. требует сжатия до высоких давлений. (Экспериментальные данные, однако, показывают, что после разгрузки продукты ударного сжатия попадают в состояние, в котором фазы высокого давления частично сохраняются – область точки F^* .) Отметим, что при увеличении скорости метания оболочки точка C^* поднимается и сдвигается вправо, а при увеличении доли графита в сжимаемой смеси сдвигается влево (последнее несколько улучшает условия образования и сохранения плотной фазы).

Сравним теперь процесс однократного сжатия в $am2$ с процессом многоволнового сжатия в $am1$. Для этого на диаграмме построим линии постепенного поднятия давления и температуры, когда при многоволновом сжатии в образце последовательно проходят ударные волны. Эти процессы рассмотрены в работах [1,8]. На диаграмме мы приводим две кривые, описывающие возможные состояния вещества при сжатии: кривая 4 соответствует сжатию порошка KCl с $\rho_0 = 0.7 \text{ g/cm}^3$, а кривая 4a – порошка с $\rho_0 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$. Видно, что в первом случае точка C^{**} оказывается в области образования кубического алмаза при $P = 30 \text{ GPa}$. При снижении давления до 20 GPa конечная точка C^{**} окажется ниже барьера быстрого фазового перехода, и выход плотных фаз может снизиться до 0% несмотря на достаточно высокую температуру. Кроме того, следует отметить, что при уменьшении доли KCl в сжимаемой смеси $T_{sh.c}$ понижается (точка C^{**} перемещается к линии G_2 и может оказаться левее этой линии, т.е. в области, где заторможены диффузионные процессы).

Кривая 4a, описывающая возможные состояния порошка с $\rho_0 = 1.4 \text{ g/cm}^3$, оказывается левее линии G_2 , т.е. в области, в которой можно ожидать только протекание мартенситных превращений графит–лонсдейлит в высокоупорядоченном исходном графите. Отметим, что при этом фазовый переход можно ожидать только в случае, когда точка C^{***} оказывается вблизи или выше линии BC . Когда P^{***} приближается к 20 GPa (точка C^{***} опускается ниже линии G_1), 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 ударной волной, а состояние, соответствующее точке C^{***} , возникает после прохождения в сжимаемом веществе нескольких ударных волн. Поэтому при сжатии в *ам1* исходный высокоупорядоченный графит на последнем этапе (перед точкой C^{***}) оказывается уже несколько разупорядоченным и условия его превращения уже не соответствуют линии BC , а могут лежать значительно выше нее (например, на линии BB^*).

Заключение

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

1. При использовании *ам1* эффективное образование плотных фаз в случае сжатия исходных порошков с $\rho_0 = 0.7 \text{ g/cm}^3$ обусловлено тем, что достигаемое состояние (точка C^{**}) лежит в области правее линии G_2 , т.е. в области быстропротекающих процессов превращения графитоподобных фаз в плотные фазы. При этом фазовый переход 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 ($C_{\text{ам}}$ или лонсдейлита) можно объяснить тем, что поскольку сжатие подвергается смесь $\text{KCl} + \text{УГМ}$, точка C^{**} для смеси реально расположена вблизи линии G_2 . Заметим, что сама линия G_2 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 G_2 и, возможно, левее, т.е. в условиях заторможенных диффузионных процессов, и эта часть УГМ превращается в метастабильные фазы. В случае исходного порошка с $\rho_0 = 1.4 \text{ g/cm}^3$ P , T -условия таковы, что сажа не будет превращаться в плотные фазы, поскольку $T_{\text{sh.c}}$ слишком низка (точка C^{***} лежит значительно левее линии P_2), 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.

2. При использовании *ам2* образование плотных фаз из исходных порошков с $\rho_0 = 0.7 \text{ g/cm}^3$ не фиксируется, поскольку при сжатии таких порошков достигаемое состояние лежит в области стабильности графитоподобных фаз и фазовые переходы не протекают. В случае сжатия порошков с исходной $\rho_0 = 1.4 \text{ g/cm}^3$ превращения УГМ в плотные фазы происходят при температурах, значительно более высоких, чем температуры, достигаемые в *ам1*. В

этом случае достигаемые P , T -состояния лежат глубоко в области диффузионных процессов; поэтому даже если на начальных этапах фазовых переходов 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 характерны более высокая степень сжатия и более низкая $T_{sh.c}$).

3. Результаты проведенного исследования показали более высокую эффективность использования $am1$ по сравнению с $am2$ при получении плотных фаз из графита. При синтезе плотных фаз из сажи $am2$ могут оказаться более эффективными, поскольку позволяют сжимать значительно больший объем УГМ. Следует также отметить, что получать метастабильные фазы с достаточно высоким выходом удается только в $am1$, поскольку в $am2$ практически не удается реализовать процесс сжатия до состояний, лежащих левее G_2 , но выше G_1 , обеспечивая при этом и эффективную закалку фаз высокого давления.

1. А.В. Курдюмов, В.Ф. Бритун, Н.И. Боримчук, В.В. Ярош, Мартенситные и диффузионные превращения в углероде и нитриде бора при ударном сжатии, Изд-во Куприянова, Киев (2005).
2. А.В. Курдюмов, В.Ф. Бритун, В.В. Ярош, А.И. Даниленко, В.Б. Зелявский, Сверхтвердые материалы № 1, 27 (2012).
3. А.В. Курдюмов, В.Ф. Бритун, В.В. Ярош, Н.И. Боримчук, А.И. Даниленко, В.Б. Зелявский, Сверхтвердые материалы № 5, 36 (2009).
4. В.В. Даниленко, Синтез и спекание алмаза взрывом, Энергоатом, Москва (2003).
5. T. Komatsu, M. Nomura, J. Kakudate, S. Fujiwara, J. Mater. Chem. **6**, 1799 (1996).
6. Y. Kakudate, M. Yoshida, S. Usuba, H. Yokoi, S. Fujiwara, M. Kawaguchi, K. Sako, T. Sawai, Trans. Mater. Res. Soc. Jpn. **B14**, 1447 (1994).
7. А.В. Курдюмов, Кристаллография **2**, 969 (1975).
8. В.Ф. Бритун, А.В. Курдюмов, Н.И. Боримчук, В.В. Ярош, ФТВД **15**, № 3, 71 (2005).
9. В.В. Даниленко, Взрыв. Физика, техника, технология, Энергоатомиздат, Москва (2010).
10. И.В. Ломоносов, В.Е. Фортков, А.А. Фролова, К.В. Хищенко, А.А. Чарахчян, Л.В. Шуршалов, ЖТФ **73**, № 6, 66 (2003).
11. D.J. Erskine, W.J. Nellis, J. Appl. Phys. **71**, 4882 (1992).
12. С.Б. Кормер, М.В. Синицын, Г.А. Кириллов, В.Д. Урлин, ЖЭТФ **48**, 1033 (1965).
13. F.P. Bundy, W.A. Bassett, M.S. Weathers, R.J. Hemley, H.K. Mao, A.F. Goncharov, Carbon **34**, 141 (1996).
14. В.Д. Андреев, В.Р. Малик, Сверхтвердые материалы № 5, 23 (1987).

V.F. Britun, V.V. Yarosh, A.V. Kurdyumov, A.I. Danilenko

THE INFLUENCE OF THE COMPRESSION MODE ON THE PHASE TRANSFORMATIONS IN CARBON UNDER THE SHOCK COMPRESSION

A compression of phase transformations in carbon-graphite materials (CGM) has been performed with using two schemes: 1) in cylinder ampoules with the central rod under the direct contact of the explosive and the ampule and 2) in ampoules without the rod but with projectile external shell. It has been found that the shock compression with using the second scheme provides higher absolute output of diamond. But contrary to the first scheme, the products of the shock compression do not almost contain lonsdaleite or dense amorphous phase. The analysis has shown that in the second case, the states characterized by low pressure but higher temperature are realized that result in transformation of metastable phases to the stable diamond.

Keywords: shock compression, loading pattern, graphite, diamond, phase transformations

Fig. 1. Scheme of the recovered ampoules: 1 – explosive, 2 – cylinder ampoule with the specimen, 3 – the central rod, 4 – throw shell

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the products of the shock compression of graphite (*a*, *б*) and carbon black (*в*, *г*) in *am1* (*a*, *в*) and *am2* (*б*, *г*). Indexes *g* and *cb* correspond to graphite and carbon black, those of *lon* and *d* are related to the lonsdaleite and diamond, respectively; *C_{am}* is the dense amorphous phase of carbon

Fig. 3. Mass velocity dependence of the pressure to analyze the processes in *am1* and *am2*: 1 – shock adiabat of steel; 2 – *P(u)* relationship for the products of detonation; 3, 6 – *P(u)* relationships for the reflected waves in the ampoule; 4, 5 – shock adiabats of the samples

Fig. 4. Pressure–temperature diagram for the description of the state of the sample under compression: *LE* is the phase equilibrium line between graphite and diamond; *G₁* is the barrier for direct transformation of graphite into diamond under static compression [13]; *G₂* is the boundary between the areas of formation of metastable and stable phases (on the left) and diamond (on the right); 1 and 1*a* – states formed under the shock compression of highly ordered and low-disordered graphite [10]; 2 and 3 – states formed under the shock compression of carbon in *am2*; 4 and 4*a* – in *am1*