

В заключение укажем на некоторые особенности подкачки энергии к волне в двухфазных средах и их отличие от таковых в однофазном тепловыделяющем газе. В последнем мощность источника тепловыделения в участке сжатия пропорциональна возмущениям плотности и давления [2], и газ подогревается синфазно сжатием, тогда как в газозвеси в силу различия возмущенных средних температур частиц и газа имеет место сдвиг фаз. Первоначально в течение характерного времени τ_t возмущенный волной межфазный поток тепла Q' направлен от газа к частицам; после выравнивания температур T'_0 и T'_1 поток меняет знак на обратный и происходит уже нагрев газа. И если τ_t порядка периода волны или больше, то волна затухает.

В двухфазных системах существует также особенный механизм подкачки энергии к волне, связанный с процессом массообмена. Действительно, в участке сжатия волны газ дополнительно уплотняется за счет того, что выделяющийся в результате реакции газ имеет большую молекулярную массу, чем окислитель.

*Поступила в редакцию 23/V 1984,
после доработки — 24/X 1984*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Борисов.— В кн.: Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах. Новосибирск, 1977.
2. И. С. Глушков, Ю. А. Кареев. ТВТ, 1970, 8, 5.
3. J. Srinivasan, W. G. Vincenti. Phys. Fluids, 1975, 18, 8.
4. К. И. Артамонов, А. П. Воробьев. МЖГ, 1978, 6.
5. J. F. Clarke. J. Fluid. Mech., 1977, 81, 2.
6. E. Ott, W. M. Manheimer e. a. Phys. Fluids, 1973, 16, 5.
7. Р. И. Нигматулин. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
8. Ю. А. Буевич, С. П. Федотов.— В кн.: Проблемы тепло- и массопереноса в топочных устройствах, газогенераторах и химических реакторах. Минск, 1983.
9. Yu. A. Buyevich, I. N. Shchelchikova. Prog. Aerospace Sci., 1978, 18, 2.
10. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
11. М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. Теория волн. М.: Наука, 1979.
12. П. С. Ланда. Автоколебания в распределенных системах. М.: Наука, 1983.

НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО ГРАФИТОПОДОБНОГО НИТРИДА БОРА В РЕЗУЛЬТАТЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ

*Г. А. Ададуров, Н. И. Алексеев, И. Н. Грознов, В. Д. Кузнецов
(Москва)*

Известно, что под действием высоких статических давлений или ударного сжатия обычная графитоподобная гексагональная решетка нитрида бора (α -BN) переходит в более плотноупакованную кубическую (κ -BN, структурный тип сфалерита) и гексагональную (σ -BN, структурный тип вюртцита) решетки [1—5]. В настоящее время изучены структура плотных фаз [2, 6—8], их ИК-спектры [2—5] и условия образования [2, 5, 7, 9]. Рентгеновские и электронографические исследования структуры и субструктуры образцов σ -BN, подвергнутых ударному сжатию, позволили предложить механизмы фазовых переходов σ -BN в плотные фазы [5, 7, 9].

Переход от слоистой структуры к плотноупакованной сопровождается перестройкой химической связи, что приводит к изменению физических свойств исследуемых образцов. Так, при фазовых переходах в σ -BN в результате ударного сжатия наблюдали изменение интенсивности и появление новых полос поглощения в ИК-спектрах, а также изменение оптических свойств образцов [2, 5, 7].

Предыдущие исследования влияния ударного сжатия на пиролитический z -BN показали, что фазовый переход в плотные фазы осуществляется только при использовании веществ с низкой концентрацией дефектов и с достаточно высокой плотностью [5, 4], т. е. реальная структура исходного материала существенно влияет на возможность фазового перехода. Например, превращение пиролитических графита в алмаз и нитрида бора в плотные модификации [10] в условиях ударного сжатия требует вдвое большего давления. Можно предполагать, что по аналогии с фазовым переходом графит — алмаз превращение z -BN в плотную фазу будет сопровождаться значительным уменьшением магнитной восприимчивости χ ($\text{м}^3/\text{кг}$). Так, у графита $\chi_{\parallel} = -0,50 \cdot 10^{-9}$, $\chi_{\perp} = -9,5 \cdot 10^{-9}$, $\langle \chi \rangle = -3,5 \cdot 10^{-9}$ (значки \parallel и \perp означают ориентацию гексагональной плоскости параллельно и перпендикулярно к вектору магнитной индукции B), в то время как у алмаза $\chi = -0,49 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ [11]. В работе [12] изучена анизотропия магнитных свойств пиролитического z -BN, но образцы, подвергнутые ударному сжатию, не исследованы.

В настоящей работе исследовалось влияние ориентации гексагональных плоскостей относительно фронта ударной волны (УВ) на изменение его свойств. Особое внимание уделено изменению диамагнитных свойств пиролитического z -BN с целью получения дополнительной информации о степени дефектности структуры и ее влияния на возможность перехода в плотные фазы.

Объектами исследования служили пластины крупно- и мелкозернистого z -BN со слоистой структурой плотностью $2,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, толщиной несколько миллиметров. Графитоподобные слои были преимущественно расположены параллельно подложке и легко отделялись у z -BN с крупной текстурой и труднее с мелкой. Техника подготовки ориентированных образцов для ударного сжатия и магнитных измерений, выполненных с помощью квантового магнитометра, подробно описана в [13].

Образцы, ориентированные гексагональными слоями перпендикулярно или параллельно фронту ударной волны, подвергали ударному сжатию в геометрии плоского нагружения в одних и тех же условиях в интервале давлений 10—20 ГПа при комнатной начальной температуре в течение нескольких микросекунд в соответствии с известной методикой [14]. Наибольшие трудности, связанные с магнитными измерениями, вызваны необходимостью тщательного предохранения образцов от попадания в них магнитных примесей при их подготовке и в особенности при ударном воздействии. Как и в работе [15], обнаружено, что в образец во время сжатия проникают пары железа с внутренней поверхности ампулы. Поэтому в рамках техники плоского нагружения разработана герметичная ампула из немагнитной нержавеющей стали, полностью предохраняющей внутренний объем от попадания паров металла за исключением тех случаев, когда в процессе удара в основаниях ампулы появлялись трещины.

По дифрактограммам пиролитического z -BN определены постоянные решетки $a = 2,49 \text{ \AA}$ и $c = 6,88 \text{ \AA}$, что соответствует данным, приведенным в [16] ($a = 2,49 \text{ \AA}$ и $c = 6,84 \text{ \AA}$). Повышенное значение межслоевого расстояния c в образцах говорит об их большей дефектности. Для сравнения укажем, что определенные в настоящей работе постоянные решетки технического z -BN, обладающего более совершенной структурой, составили $a = 2,50 \text{ \AA}$ и $c = 6,66 \text{ \AA}$, что полностью совпадает с данными [2]. Вторая отличительная особенность дифрактограмм пиролитического z -BN состоит в существенно ином распределении интенсивностей I по пикам по сравнению с техническим (см. рисунок).

Ориентируясь на результаты исследований [5, 10], можно было ожидать, что давления до 20 ГПа будут малы для образования плотных фаз в пиролитическом z -BN и в экспериментах с сохранением образцов. Действительно, при анализе дифрактограмм образцов, подвергнутых ударному сжатию, новых пиков, соответствующих плотной фазе, не обнаружено. Постоянные решетки в пределах ошибки эксперимента остались прежии-

Сравнительные схемы дифрактограмм α -BN:

а) пиролитический, исходный; б) пиролитический, фронт УВ перпендикулярен гексагональным слоям; в) пиролитический, фронт УВ параллелен гексагональным слоям; г) технический.

мп, по произошло существенное перераспределение интенсивностей отражений, особенно заметное по линиям (002), (100), (101). Эти изменения сильнее выражены у «перпендикулярно» сжатых образцов (фронт ударной волны перпендикулярен к гексагональным слоям) по сравнению с образцами, сжатыми «параллельно». При этом распределение интенсивностей у «перпендикулярно» сжатых образцов приближается к распределению для технического α -BN.

Дать точный механизм относительных изменений интенсивностей максимумов по данным дифрактограмм не представляется возможным ввиду многочисленности факторов, влияющих на результаты измерений. Поэтому, не проводя детального анализа, можно заключить, что наблюдаемая на рисунке картина не противоречит общему предположению [6, 17] о том, что вследствие ударного воздействия в пиролитическом α -BN происходит заметное упорядочение структуры на микроуровне как в расположении атомов внутри слоев, так и в расположении слоев относительно друг друга. При этом, по-видимому, дефекты, имевшие место в исходном пиролитическом α -BN, вследствие микросдвигов, возникающих в результате динамического сжатия, скапливаются, образуя ассоциаты, или стекают в поля напряжений, обусловленных наличием дислокаций [18]. Процесс этот, естественно, более выражен при перпендикулярном ударе, облегчающем перемещение гексагональных слоев, чем при параллельном, вызывающем преимущественно уплотнение образца. Тем не менее в обоих случаях получаемая в результате ударного воздействия структура пиролитического α -BN далека по кристалличности от структуры технических образцов.

С целью обнаружения возможного присутствия плотной фазы отсняты ИК-спектры ударно-сжатых образцов на спектрометре ИКС-29 в диапазоне $400 \div 4000 \text{ см}^{-1}$. Образцы исследовали в таблетках, изготовленных из 2 мг BN и 300 мг KBr. Новые полосы поглощения, соответствующие плотной фазе, в сжатых образцах не обнаружены. Линии поглощения для пиролитического α -BN совпадают с приведенными в [2, 5, 6] для технического α -BN. Как и в [6], отмечено, что вследствие ударного воздействия в пиролитическом α -BN происходит рост интенсивности полос поглощения в ИК-области, связанный с усовершенствованием кристаллической структуры, причем явление выражено сильнее у перпендикулярно сжатых образцов и слабее у сжатых параллельно. Отметим, что полосы поглощения в техническом α -BN намного интенсивней, чем в изученных образцах пиролитического α -BN. ИК-спектры технических образцов при том же уровне поглощения снимали в таблетках, в которых 0,5 мг BN запрессованы в 500 мг KBr. Таким образом, данные ИК-спектроскопии и рентгеновского фазового анализа находятся в полном согласии.

Образование плотных форм нитрида бора, сопровождающееся увеличением плотности образцов, не обнаружено также и пикнометрией, проводившейся с откачкой воздуха по методике, описанной в [19]. Плотность как исходного, так и подвергнутого ударному сжатию пиролитического α -BN составляла $(2,00 \pm 0,01) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

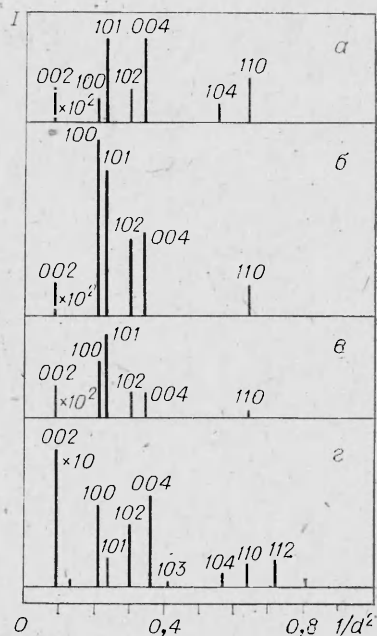


Таблица 1
Удельная магнитная восприимчивость образцов ($\chi \cdot 10^9$, $\text{м}^3/\text{кг}$) пиролитического нитрида бора

Номер опыта	Исходный образец			Ударно-сжатый образец	
	$-\chi_{\perp}$	$-\chi_{\parallel}$	$-\langle\chi\rangle$	$-\langle\chi\rangle'$	$-\langle\chi\rangle''$
1	3,2	7,7	4,7	1,7	4,5
2	2,6	5,9	3,7	—	—
3	4,1	5,5	4,6	—	—
4	2,8	7,2	4,3	3,7	3,8
5	4,2	6,6	5,0	3,4	—
6	4,3	6,7	5,1	0,4	1,3
7	4,3	6,8	5,1	1,7	1,6
8	3,5	6,3	4,4	0,6	3,1

Примечание. Значения $-\langle\chi\rangle'$ и $-\langle\chi\rangle''$ соответствуют перпендикулярной и параллельной ориентациям фронта ударной волны по отношению к гексагональным связям.

В первых трех графах таблицы видно, что различные образцы пиролитического g-BN обладают заметно разными значениями χ и различной степенью анизотропности, что связано в основном с условиями получения вещества.

В образцах, подвергнутых ударному сжатию, удалось измерить $\langle\chi\rangle$. Анализ восприимчивости образцов после сжатия показывает, что абсолютные значения $\langle\chi\rangle$ уменьшились как при перпендикулярном, так и при параллельном ударе, но в первом случае изменения более значительны. Особенно заметно влияние ориентации исходного образца по отношению к фронту ударной волны по результатам опытов 1, 6 и 8. В то же время условия ориентации образца не всегда являются определяющими, что видно по данным опытов 4 и 7.

Одной из возможных причин уменьшения абсолютного значения $\langle\chi\rangle$ ударно-сжатых образцов может служить появление парамагнитных центров, связанных с дефектами кристаллической решетки. Их появление обнаружено ЭПР-спектроскопией в работе [20], где парамагнитные центры формировали в процессе ударного сжатия с одновременной закалкой нитрида бора. Для определения вклада парамагнитных центров в магнитную восприимчивость измерена их концентрация методом ЭПР на спектрометре ERS-200 на частоте 10 ГГц. Образцы для измерений при комнатной температуре готовили в кварцевых ампулах по обычной методике, измерения проводили методом сравнения с эталоном. В [20] зарегистрировали десятикомпонентный сигнал, а в данной работе во всех образцах получен слабый однокомпонентный сигнал. Отличие в спектрах, по-видимому, свя-

Результаты измерения магнитной восприимчивости исходных и подвергнутых ударному сжатию образцов представлены в табл. 1, где приняты следующие обозначения: χ_{\parallel} , χ_{\perp} — удельная магнитная восприимчивость при ориентации вектора магнитной индукции параллельно и перпендикулярно гексагональным слоям, $\langle\chi\rangle$ — среднее значение, рассчитанное по формуле $\langle\chi\rangle = (2\chi_{\parallel} + \chi_{\perp})/3$. Из

Таблица 2
Изменение магнитных свойств пиролитического g-BN в результате ударного сжатия

Номер опыта	Исходный образец			Ударно-сжатый образец		
	$n \cdot 10^{20}$	$\chi_{\text{ПМ}} \cdot 10^9$	$-\chi_{\text{ДМ}} \cdot 10^9$	$n \cdot 10^{20}$	$\chi_{\text{ПМ}} \cdot 10^9$	$-\chi_{\text{ДМ}} \cdot 10^9$
4	1,65	0,10	4,4	2,45	0,15	3,8
				3,98	0,25	4,0
6	1,65	0,10	5,2	3,67	0,23	0,6
				3,77	0,23	1,5
8	1,75	0,11	4,5	5,32	0,33	0,9
				7,59	0,47	3,6

Примечание. n — концентрация парамагнитных центров (данные ЭПР), $1/\text{кг}$; $\chi_{\text{ПМ}}$, $\chi_{\text{ДМ}}$ — парамагнитный (при температуре измерения 4,2 К) и диамагнитный вклад в удельную магнитную восприимчивость, $\text{м}^3/\text{кг}$. Число в числителе соответствует ориентации фронта волны перпендикулярно гексагональным слоям, в знаменателе — параллельной ориентации.

зано с разными методами получения образцов, подвергнутых сжатию, и режимами их закалки.

Результаты обработки измерений приведены в табл. 2. Вследствие ударного сжатия концентрация парамагнитных дефектов увеличивается по сравнению с исходными образцами, причем при параллельном ударе концентрация дефектов оказывается несколько выше, чем при перпендикулярном. Этот фактор находится, видимо, в тесной связи с принципиально различными типами дефектов в графитоподобном пиролитическом нитриде бора: турбостратными и политипными [21, 22]. В любом случае вклад парамагнитных центров в магнитную проницаемость оказывается существенно меньше диамагнетизма исходных или сжатых образцов и поэтому практически не меняет результатов, приведенных в табл. 1. Исправленные с учетом вклада парамагнитных центров значения магнитной восприимчивости приведены в табл. 2.

Для контроля результатов, полученных при определении вклада парамагнитных центров, измерена магнитная восприимчивость образцов с откачкой гелия из криостата до температуры 3 К. Обнаруженные изменения χ во всех случаях не превышали 8%. Этот факт также подтверждает незначительный вклад парамагнитных центров независимо от их природы в наблюдаемое изменение χ вследствие ударного воздействия.

Суммируя результаты выполненного исследования, можно заключить, что вследствие ударного воздействия до 20 ГПа на ориентированные образцы графитоподобного пиролитического нитрида бора образование плотной фазы не происходит, что находится в согласии с выводами работ [5, 10]. Более того, необходимо отметить, что в настоящей работе, как и в [5, 6], наблюдается совершенствование структуры исследованных образцов на микроуровне при ударном воздействии. Этот процесс происходит интенсивней, если фронт ударной волны распространяется перпендикулярно к гексагональным слоям слоистой структуры. В то же время наблюдается сильное изменение магнитных свойств вещества, связанное с незначительным увеличением концентрации парамагнитных дефектов, с одной стороны, а с другой — с резким уменьшением диамагнитной восприимчивости. Изменение последней происходит, как правило, заметнее в образцах, подвергнутых перпендикулярному воздействию.

Исходя из существующих модельных представлений о переходе слоистого α -BN в плотные фазы — вюрцитоподобную (мартенситный механизм) и сфалеритную (диффузионный механизм) [9], по приведенным в работе данным можно сделать заключение, что полученные результаты свидетельствуют в пользу первого. Изменение магнитной восприимчивости, отмеченное в опыте, может происходить по двум причинам:

- 1) образование плотной фазы с существенно меньшим по абсолютной величине значением χ ;
- 2) затрудненный перенос электронов по π -связям в гексагональных слоях α -BN.

Предположение об образовании плотной фазы не удовлетворяет данным рентгеновского анализа и ИК-спектроскопии. Наблюдаемое в эксперименте столь сильное изменение χ означало бы, что образец почти полностью или более чем наполовину перешел в плотную фазу, что обязательно было бы отмечено другими методами.

Затрудненный перенос электронов по π -связям можно объяснить в рамках модели мартенситного перехода в вюрцитоподобную фазу. По этому механизму [9] происходят образование «сшивок» между слоями и гофрировка слоев, приводящая к изменению углов между связями от плоской гексагональной сетки к трехмерной тетраэдрической. Образование подобных «сшивок» даже в небольших количествах в рамках структуры α -BN должно приводить к разрыву сетки π -связей в месте сшивки. Это создает сильное возмущение в электронном состоянии слоя и затрудняет перенос электрона, что и определяет в конечном счете уменьшение значений χ . Учитывая существенно коллективный характер переноса электронов внутри гексагонального слоя, можно заключить, что незначи-

тельная концентрация (не более 1%) подобных «сшивок», неуловимая другими методами, полностью подавляет диамагнетизм и магнитную анизотропию исходной слоистой структуры. Из приведенных выше результатов видно, что процесс образования «сшивок» протекает интенсивней в образцах, сжатых перпендикулярно и отличающихся более совершенной микроструктурой, чем параллельно сжатые образцы. Интересно отметить, что, несмотря на образование отдельных «сшивок» между слоями, процесс перехода в плотную фазу в пиролитическом α -BN практически не развивается, что говорит о решающем влиянии дефектов структуры на возможность перехода.

Ориентация гексагональных слоев по отношению к фронту волны оказывает значительное, но не определяющее влияние на изменение свойств пиролитического α -BN (см. табл. 1 и 2). Микродвижения, связанные с распространением фронта ударной волны, вызывают в перпендикулярно сжатых образцах α -BN движение слабосвязанных гексагональных слоев, что облегчает сток и ассоциацию турбостратных и исчезновение политипных дефектов, чем и объясняется более совершенная кристаллическая структура этих образцов. В случае параллельного удара гексагональные слои перемещаются менее интенсивно, движение дефектов в этом случае оказывается затрудненным и, судя по данным ЭПР, происходит по несколько иному механизму. Обилие дефектов в параллельно сжатых образцах и отсутствие дальнего порядка затрудняют возможность образования «сшивок» между слоями как начальной стадии образования плотной фазы. Индивидуальные «сшивки» как зародыши новой фазы появляются в пиролитическом α -BN до гофрировки слоев, а не вместе с нею, как это имеет место в техническом α -BN, где переход в плотную фазу является коллективным процессом [7].

Основываясь на литературных данных [5, 10] и результатах настоящей работы, в дополнение к уже сказанному о роли дефектов в обсуждаемых превращениях можно добавить следующее. При ударном сжатии хорошо окристаллизованных графита или α -BN для их превращения достаточно создать необходимые давления и температуры в области стабильности плотных фаз. Об этом свидетельствуют и результаты [22, 23], где показано, что динамическое изоэнтропическое сжатие, при котором существенно снижена температура образца во фронте ударной волны, не приводит к превращению α -BN и ϵ -BN, а предварительный нагрев образцов позволяет создать необходимые $p - T$ -условия для образования плотной фазы. Для превращения же сильно дефектного пиролитического α -BN необходим предварительный отжиг дефектов. Процесс этот является термически активируемым, и температуры, необходимые для отжига дефектов за время прохождения фронта волны, достигаются для плотных образцов (плотность $\sim 2,0 \cdot 10^3$ кг/м³) при ударном сжатии лишь только при давлении, вдвое превышающем давления превращения образцов с совершенной структурой.

В заключение отметим, что наличие переходных процессов, заключающихся в образовании отдельных «сшивок» между слоями и происходящих на самой ранней стадии образования плотной фазы, надежно удалось зарегистрировать лишь магнитометрическим методом с использованием сверхчувствительного квантового магнитометра.

Авторы выражают глубокую благодарность Т. В. Бавиной за полезное обсуждение полученных результатов.

Поступила в редакцию 24/1 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Wentorf. J. Chem. Phys., 1962, 36, 7, 1987.
2. Г. А. Ададулов, З. Г. Алиев, Л. О. Атовмян и др. Докл. АН СССР, 1967, 172, 5, 1066.
3. Л. В. Альтшулер, М. Н. Павловский, В. П. Дракин. ЖЭТФ, 1967, 52, 2, 400.
4. P. de Carli. Bull. Amer. Phys. Soc., 1967, 12, 4, 1127.
5. С. С. Бацанов, Л. Р. Бацанова, Г. С. Доронин и др. Ж. структ. химии, 1968, 9, 6, 1024.

6. С. С. Бацанов, Г. Е. Блохина, А. А. Дерibas. Ж. структ. химии, 1965, 6, 2, 227.
7. А. В. Курдюмов, Н. Ф. Островская, А. Н. Пилянкевич и др. Докл. АН СССР, 1974, 215, 4, 836.
8. Т. В. Бавина, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1975, 11, 4, 773.
9. А. В. Курдюмов. Автореф. докт. дис. Киев, Ин-т проблем материаловедения АН УССР, 1976.
10. W. H. Gust, P. A. Yong. Phys. Rev. (B), 1977, 15, 12, 5014.
11. Краткий физико-технический справочник. Т. 1. Математика, физика. М.: ГНТИ, 1960.
12. В. Д. Кузнецов, И. Г. Кузнецов, В. Г. Гвоздарев. Изв. вузов. Физика, 1980, 3, 136.
13. Н. И. Алексеев. Автореф. канд. дис. М.: ИХФ АН СССР, 1982.
14. С. С. Бацанов. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1970, 6, 4, 697.
15. А. В. Курдюмов, И. Н. Францевич. Докл. АН СССР, 1975, 221, 3, 589.
16. A. Simpson e. a. J. Phys. D: Appl. Phys., 1976, 9, 4, 621.
17. А. В. Курдюмов, Н. Ф. Островская, А. М. Пилянкевич и др. Докл. АН СССР, 1973, 209, 5, 1081.
18. Ж. Фридель. Дислокации. М.: Мир, 1967.
19. С. И. Митрофанов. Исследование попутных ископаемых на обогатимость. М.: Госгортехиздат, 1962.
20. М. В. Власов, Н. Г. Каказей, Г. И. Саввакин. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1980, 16, 12, 2160.
21. А. В. Курдюмов. Кристаллография, 1972, 17, 4, 620.
22. А. В. Курдюмов. Кристаллография, 1975, 20, 5, 969.
23. Г. А. Ададуров, Т. В. Бавина, О. Н. Бреусов. ФГВ, 1981, 17, 2, 159.

ПСЕВДОНЕДОСЖАТАЯ ДЕТОНАЦИЯ В РАСПЫЛАХ

Д. В. Воронин, В. В. Митрофанов

(Новосибирск)

В рамках динамики многоскоростной среды рассматривается детонация газозвесей, в которых химическая реакция протекает только в газовой фазе и лимитируется скоростью фазового перехода конденсированной фазы (к-фазы) в газ. Одно из существенных отличий таких систем от гомогенных состоит в том, что исходный газ участвует в реакции сразу весь, а конденсированный компонент вовлекается в реакцию постепенно. В математических моделях гетерогенной детонации [1—3] предполагалось, что за фронтом ударной волны (УВ) тепловыделение на единицу массы к-фазы, перешедшей в газ, остается постоянным. Если при этом не налагать на характер движения среды в плоскости Чепмена — Жуке дополнительных ограничений (например, предполагать выравнивание скоростей фаз при заданной из эксперимента скорости детонации D [2] или совпадении точки Жуке с окончанием периода индукции [3]), а трением и теплоотводом в стенки трубы пренебречь, то в одномерной постановке задача дает решение только с полной газификацией к-фазы в звуковой точке (псевдогазовая детонация). В экспериментах же зафиксировано значительное недогорание капель [2, 4]. Поэтому необходимо более строгое моделирование процессов, происходящих в детонационной волне, в частности дробления капель и смешения, влияния стенок, изменения теплового эффекта в зоне реакции вследствие процессов диссоциации и рекомбинации. В настоящей работе анализируется влияние только последних названных факторов.

Будем считать, что состав газа по истечении задержки воспламенения является химически равновесным, и используем для определения величины теплового эффекта приближенное уравнение химического равновесия [5]. Поскольку состав газа в зоне реакции меняется от сильно обедненного до переобогащенного атомами конденсированного компонента (если содержание последнего в системе достаточно велико), тепловыделение на единицу массы продуктов реакции проходит через максимум и скорость детонации для гетерогенной смеси может оказаться выше, чем для газовой смеси того же начального состава. Конечное состояние