

УДК 541.12.034.2 : 036

**ПРЕВРАЩЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ
ПРИ ИХ УДАРНО-ВОЛНОВОМ СЖАТИИ В РЕГУЛИРУЕМЫХ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Агадуров Г. А., Гольданский В. И.

Изложены результаты работ по развитию динамического метода воздействия на вещество. Основное внимание уделено разработке методов изоэнтропизации ударного сжатия, позволяющих существенно уменьшить тепловую составляющую давления. Рассмотрено влияние на физико-химические превращения веществ давления, температуры, микро- и макропластических деформаций, а также волны разгрузки. Обсуждены вопросы, связанные с возможностью изучения низкотемпературного сжатия конденсированных газов в динамических условиях и химических синтезов при ударном сжатии систем твердое вещество — газ.

Библиография — 53 ссылки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Введение	1810
II. Область ударно-волнового сжатия	1812
III. Исследование способов регулирования термодинамических параметров при динамическом сжатии	1815
IV. Влияние волн разгрузки на физико-химические превращения конденсированных веществ	1822
V. Прямое использование высоких давлений и температур, развивающихся при детонации взрывчатых веществ	1823
VI. Заключение	1825

I. ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей статьи — рассмотрение возможности реализации различных областей диаграммы состояния веществ (p, T -диаграмма, где p — давление, T — температура) и получение больших степеней сжатия при варьируемом разогреве вещества в динамических экспериментах. Под динамическим воздействием понимается сжатие веществ при различном характере нагружения: от сжатия одно- и многократными ударными волнами (УВ) до динамического изоэнтропического (точнее — приближающегося к изоэнтропическому) сжатия (ДИС). Ударные волны в конденсированных средах в динамических экспериментах создаются контактной детонацией взрывчатых веществ (ВВ) или ударом тел, разогнанных продуктами взрыва до высокой скорости.

Динамическое направление физики и химии высоких давлений включает: а) исследования состояния вещества во время ударного сжатия (изучение сжимаемости и установление уравнений состояния; изучение упруго-пластических характеристик, оптических и электрических свойств; исследование низкотемпературной плазмы, возникающей при разгрузке ударно-сжатых пористых веществ) и б) исследования физико-химических превращений веществ, помещенных в прочные контейнеры (ампулы сохранения) и сохраненных после ударного сжатия. Последнее направление получило широкое развитие в последние два десятилетия в связи с непосредственным практическим выходом — осуществлением ряда синтезов в УВ.

Некоторые разделы физики и химии высоких давлений относят и к физике высоких плотностей энергии.

На рис. 1а изображена p, T -диаграмма, обобщающая реально освоенные в настоящее время области применения высоких статических и динамических давлений (на рисунке заштрихованы). Для упрощения диаграммы область давлений $\sim 10^3$ ГПа и температур 10^4 — 10^5 К, доступная в экспериментах по изучению сжимаемости [1], а также область давлений в несколько сотен ГПа и температур 10^3 — 10^4 К, реализуемая в экспериментах с сохранением вещества [2], в основном при осесимметричной геометрии нагружения — не указаны.

Несомненное достоинство статического метода — возможность длительного воздействия на вещество высоких давлений и температур, а также соблюдение желаемой последовательности изменения обеих этих величин (рис. 1б). Как правило, исходный материал сначала подвергают действию высокого давления, затем нагревают и после выдержки снижают температуру, а затем давление. Это дает возможность сохранять метастабильные состояния вещества при нормальных условиях. В общем виде вопросы термодинамики и скоростей превращений в статических условиях сжатия обсуждались в обзоре [3].

Ударное сжатие указанных преимуществ не имеет. Действительно, рост давления и температуры происходит одновременно в узкой зоне — фронте УВ за времена 10^{-12} — 10^{-9} с, затем спустя $\sim 10^{-6}$ с происходит снятие давления изоэнтропическими волнами разгрузки, причем температура уменьшается только до некоторой величины ($T_{\text{ост}}$, рис. 1в).

за счет необратимости ударного сжатия. Весь процесс ударного сжатия завершается за $\sim 10^{-5}$ с; дальнейшее охлаждение уже ненагруженного вещества происходит по обычным законам теплопроводности. Очевидно, что высокие остаточные температуры могут ликвидировать образовавшиеся при сжатии фазы, что зачастую и наблюдается в действительности (например, если не принять специальных мер, происходит обратная графитизация образовавшегося при ударном сжатии алмаза).

Тем не менее метод ударного воздействия на вещество имеет свои особенности и преимущества. К ним можно отнести простоту достиже-

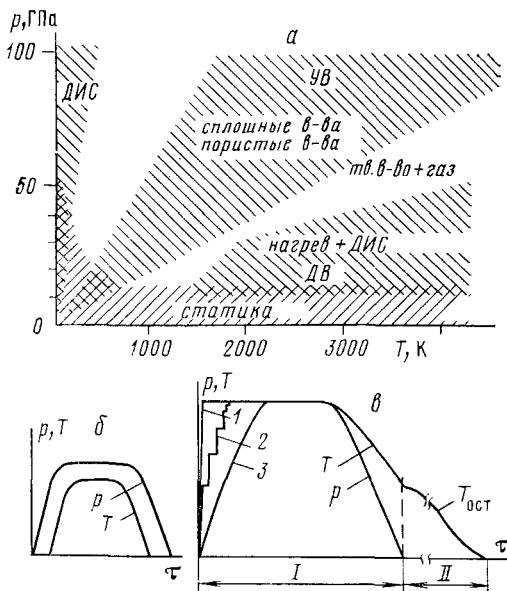


Рис. 1. Обобщенная p, T -диаграмма с указанием областей применения высоких статических и динамических давлений (а) и идеализированные зависимости p и T от времени в статических (б) и в динамических условиях сжатия (в); ДИС — динамическое изоэнтропическое сжатие; УВ — ударно-волновое сжатие твердых сплошных и пористых веществ, а также систем твердое тело — газ; ДВ — область высоких значений p и T , создаваемых в волне детонации; 1, 2, 3 — соответственно фронты волн при однократном и многократном ударном сжатиях и при ДИС.

Скорость охлаждения на участке $T_{\text{ост}}$ $\sim 10^8$ град/с; время процесса на участках I и II составляют $\sim 10^{-5}$ с и секунды соответственно

ния сверхвысоких давлений и температур, наличие сильнейших микросдвиговых деформаций во фронте УВ, по-видимому, приводящих к аномально высоким скоростям физико-химических превращений конденсированных веществ, огромные скорости охлаждения, строгую контролируемость развивающихся давлений и т. д. Осуществление самых различных физических и химических превращений в экспериментах с сохранением веществ убеждают в этом. Доказано, что ударное сжатие приводит к дефектообразованию, протеканию сложных химических реакций, полиморфизму и т. д.

В настоящей статье рассмотрены вопросы, касающиеся в основном развития метода УВ, и результаты работ, предпринятых с целью выявить, какие именно факторы (давление, температура, микро- или макропластические деформации, волны разгрузки) ответственны за тот или иной процесс. Основное внимание уделено проблеме достижения низкотемпературного сжатия в динамических условиях.

II. ОБЛАСТЬ УДАРНО-ВОЛНОВОГО СЖАТИЯ

До настоящего времени подавляющее большинство работ динамического направления физики и химии высоких давлений относится к области УВ (рис. 1а). Результаты работ по изучению свойств веществ в ходе ударного сжатия описаны во многих монографиях и обзора (см., например, [4–12]). На основании изучения свойств, сохраненных после сжатия веществ [13–16], установлено, что кратковременность процесса ударного сжатия не является серьезным ограничением этого метода. Образованные продукты удается сохранить после снятия давления при невысоких остаточных температурах, чему должны способствовать и огромные скорости ее уменьшения ($\sim 10^8$ град/с) на участке спада давления. Многие процессы могут пройти как постэффект уже после снятия давления, когда активированное фронтом УВ вещество попадает в условия высоких остаточных температур. Эта уникальная ситуация присуща, по-видимому, только УВ, и имитировать ее невозможно.

1. Плоская схема нагружения

Одностороннее нагружение вещества УВ в плоском варианте (рис. 2а) дает возможность с большой точностью определять развитые давления. Макропластические деформации образцов в ампулах, происходящие в основном при разгрузке, не превышают 10% при умеренных давлениях. Существенно, что вещества малой плотности легко могут быть сжаты до 50 ГПа многократными УВ, отраженными от более жестких металлических стенок ампулы. Конструкции плоских ампул позволяют предварительно охлаждать исследуемые образцы вплоть до 4,2 К [17], что важно при исследовании термически неустойчивых состояний вещества. Фиксации таких состояний способствует быстрый отвод тепла от исследуемого вещества к менее нагретым после ударного сжатия стенкам ампулы. Еще больший эффект достигается при быстром доохлаждении ампулы сразу после опыта, например до 77 К [17].

Систематические сравнительные исследования инициированных УВ превращений органических веществ, в частности изучение ударной полимеризации акриламида [18], показали существенную зависимость состояния образцов от начальной температуры (T_0). При $T_0 = 77$ К в продуктах реакции методом ЭПР удалось наблюдать довольно высокую концентрацию парамагнитных активных центров (АЦ): $10^{20}—10^{21}$ кг⁻¹, и была обнаружена обусловленная присутствием этих центров постп-

лимеризация, протекавшая подчас даже в форме теплового взрыва, чего не происходит при $T_0=293$ К.

Известно, что γ -облучение многих мономеров при низких температурах приводит к образованию стабилизированных АЦ, которые при нагреве ведут процесс полимеризации. В работе [19] проведено исследование влияния комплексного воздействия γ -облучения и УВ на образцы акриламида при 77 К. Установлено, что при дозах предварительного облучения в 5—6 Мрад ударное сжатие приводит к увеличению выхода полимера по сравнению с суммой вкладов отдельных воздействий. Этот результат может быть объяснен переходом процесса полимеризации к режиму теплового взрыва за счет увеличения скорости тепловыделения при одновременном инициирующем действии АЦ как радиационного, так и механического происхождения.

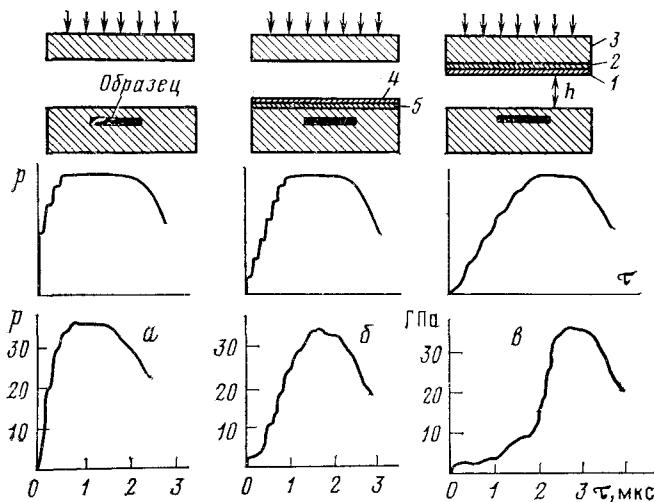


Рис. 2. Принципиальные схемы получения многократного ударного сжатия (а), динамического изоэнтропического сжатия (б, в), а также идеализированные и экспериментальные профили волн сжатия. 1, 2, 3 — пластины из плексигласа, алюминий и меди; 4, 5 — медь, плексиглас

Необходимо отметить, что при исследовании природы дефектов в ударно-сжатых веществах отмечалось, что разложение вещества не эквивалентно простому термическому распаду, и конечный результат в ряде случаев оказывается похожим на результат радиационного распада [14].

В работе [20] выполнено сравнительное изучение термического разложения перхлората аммония, предварительно подвергнутого облучению γ -радиацией дозой 1 Мрад и ударному воздействию в интервале давлений 1,5—20 ГПа. В результате дериватографического анализа обнаружено, что термическая стойкость в обоих случаях существенно уменьшается: разложение начинается при 490—500 К, в то время как исходный образец перхлората аммония начинает разлагаться при 563 К. Глубина разложения на низкотемпературной стадии возросла более чем в три раза. Увеличение амплитуды УВ до 20 ГПа при последующем нагревании образца приводит к его разложению в одну стадию на 96% при 490 К. Таким образом, как облучение, так и УВ-обработка перхлората аммония приводит к очень близким результатам.

Можно предположить, что в веществах, подвергнутых ударному воздействию, возникают те же дефекты, что и при облучении [14]. В частности, может быть принята концепция автора работы [21] о возможности возникновения локальных УВ при облучении твердых тел мощными пучками частиц. Конечно, это предположение требует строгого экспериментального подтверждения.

2. Цилиндрическая схема нагружения

Ампулы цилиндрической геометрии наиболее широко используют в экспериментах с сохранением вещества после ударного сжатия. Можно считать, что обнаруженная закономерность образования трехударной конфигурации в веществе, помещенном в цилиндрическую ампулу сохранения, при воздействии скользящей детонационной волны и появившаяся в связи с этим возможность оценки давлений [2] способствовали развитию физики и химии высоких динамических давлений. Действительно, проведенное в [2] доказательство равенства скорости детонации заряда ВВ, окружающего ампулу, и скорости распространения трехударной конфигурации позволяет без специальных прямых измерений (при известной ударной адиабате изучаемого вещества) определять величину развивающихся давлений.

Оказалось, что в данных условиях очень просто получить давления в несколько сотен ГПа. Так, использование ВВ, имеющего скорость детонации $\sim 8 \cdot 10^3$ м/с, дает в монолитных образцах из вольфрама давление ~ 500 ГПа и хлористого натрия ~ 60 ГПа [2]. Чтобы увеличить давление в соли сверх 100 ГПа достаточно смешать порошки вольфрама и соли. При небольшом содержании соли и уплотнении образца за счет многократного УВ-сжатия в ней могут быть получены давления, близкие к 500 ГПа. При таких высоких давлениях развиваются и очень высокие температуры (10^3 — 10^4 К). Условия сжатия, создаваемые при цилиндрической схеме нагружения, удобны для проведения химических синтезов (которым способствуют также и сильнейшие макропластические деформации).

3. Ударное сжатие систем твердое вещество — газ

Наиболее простой системой такого типа является вещество пониженной плотности, в порах которого находится воздух при атмосферном давлении. Можно считать, что за время ударного сжатия при малых размерах частиц твердого компонента в таких системах происходит выравнивание давления, однако термическое равновесие не устанавливается. Вследствие небольшой массовой доли воздуха его температурный вклад невелик, и средняя температура смеси будет ненамного отличаться от температуры твердого компонента, хотя в начальный момент сжатия воздух в микрообъемах разогревается намного сильнее.

При сильном ударном сжатии пористая среда испытывает большую объемную деформацию и, как следствие, большее увеличение энтропии по сравнению со сплошным веществом, сжатым до того же конечного давления [7] (рис. 1а). При ударном сжатии вакуумированных сред развивающиеся температуры могут составлять десятки тысяч градусов, и часть вещества переходит в плазменное состояние [23]; при этом может возникать тепловая эмиссия электронов [24].

Ударное сжатие пористых веществ не связано с большими трудностями при сохранении продуктов сжатия. Сложности возникают, если исследуемые объекты разлагаются или реагируют с выделением большого количества газа, а также если поры предварительно заполнены сжа-

тыми до высоких давлений или сжиженными газами. Как правило, обычно ампулы в этих случаях разрываются под действием большого внутреннего давления. Для того, чтобы ампулы сохранялись без разрыва, необходима разработка их специальных конструкций. Очевидно, что сохранению должна способствовать ситуация, когда при сжатии газ частично или полностью реагирует с образованием твердого продукта.

В последние годы нами проводились систематические исследования по разработке конструкций ампул сохранения плоского и цилиндрического типов, позволяющих осуществлять ударное сжатие смесей твердое вещество — газ с целью проведения различных химических взаимодействий [25, 26]. Разработана конструкция ампулы для плоского ударного нагружения до 40 ГПа пористых веществ в смеси с газами при начальных $T_0 \sim 300$ и 77 К [25]. Газ, например водород, подавался по тонкому трубопроводу в рабочий объем ампулы под давлением из стандартного или специального переносного баллонов. После ударного сжатия исследуемых систем ампулы не разрушались, и твердые продукты могли быть изучены. Отметим, что во всех случаях избыток газа выходил через остающееся открытым отверстие для его напуска.

Цилиндрические ампулы позволяют значительно расширить диапазон достижимых при сжатии давлений, а увеличенные макропластические деформации и вызванный ими дополнительный разогрев способствуют протеканию химических реакций. Последнее обстоятельство дало возможность получать нужный газ в процессе сжатия при разложении «донора» этого газа, например, вещества — источника кислорода, или находящегося в смеси с исследуемым веществом, или изолированного [26]. Конструкции ампул, как и в плоском варианте, также предусматривали подвод газов от баллонов и охлаждение до 77 К. При использовании твердого исследуемого компонента с большой динамической жесткостью давление в смеси могло достигать 100 ГПа и более. В отличие от плоского варианта в ряде случаев удавалось загерметизировать ампулу в процессе сжатия, и синтезированный продукт находился при некотором остаточном давлении.

С помощью описанных выше ампул были осуществлены взаимодействия различных веществ с азотом, твердой углекислотой, кислородом и водородом. В частности, показана возможность образования нитрида и карбида ниобия при ударном сжатии смеси порошка ниобия с жидким азотом и углекислотой [25]. С целью получения CO_2 в твердом состоянии при нормальных условиях в работе [26] предприняты попытки по окислению SiC в условиях ударного сжатия. Ударному сжатию в ампулах сохранения подвергали смеси порошка SiC с газообразным или жидким кислородом. Методами рентгеновского и ИК-спектроскопического анализов продуктов сжатия показано, что при взаимодействии кислорода с SiC происходит окисление последнего с образованием немолекулярной решеточной структуры. Нагревание окисленного SiC до 800—1300 К удаляет окисные формы углерода.

В результате взаимодействия разных металлов с водородом получены водородсодержащие соединения титана, марганца, а также других веществ. Показано, что в качестве источника водорода в таких взаимодействиях могут быть использованы предельные углеводороды и вода.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Жесткая связь между давлением и развиваемой температурой во фронте УВ ограничивает возможность получения достаточно высоких давлений без сопутствующего сильного разогрева вещества (рис. 1а, об-

ласть ДИС). Принципиальная возможность ослабления разогрева при ударном сжатии за счет организации ступенчатого сжатия известна и используется в экспериментах по регистрации, например сжимаемости в ходе сжатия, а также в опытах с сохранением вещества. Различные схемы экспериментов с сохранением образцов, разработанные в простом техническом исполнении, позволяют изменять характер нагружения вещества в ампуле от однократного до многократного ударного сжатия, время воздействия высоких давлений, начальную температуру и т. д.

Многократное ударное сжатие вещества значительно уменьшает энтропию по сравнению с однократным сжатием до того же конечного давления. Однако при многократном УВ-сжатии сильно сжимаемых конденсированных веществ до высоких давлений амплитуда первой УВ значительна и вносит основной температурный вклад в конечный нагрев. Например, при многократном ударном сжатии плексигласа до давлений 50 и 100 ГПа амплитуды первых УВ составляют ~ 10 и 20 ГПа. При таких давлениях развивающиеся в момент сжатия температуры уже равны 770 и 1570 К соответственно, а остаточные после разгрузки — 520 и 860 К [9].

Очевидно, что для получения низкотемпературного динамического сжатия необходимо уменьшить амплитуду первой УВ и увеличить кратность сжатия. В наших работах это было достигнуто путем использования слоевых систем [27]. По-видимому, «плавное» динамическое сжатие может быть получено и другими способами. Некоторые из них описаны в работах [28—30]. Как нам представляется, магнитокумулятивные генераторы [30] вряд ли смогут быть использованы в экспериментах с сохранением вещества.

1. Слоевые системы

На рис. 2 приведены наиболее просто реализуемые схемы экспериментов в плоском варианте нагружения (возможно и использование осесимметричных схем) для многократного ударного сжатия (a), сжатия путем перепускания УВ через систему экранов с различным значением динамической жесткости (б) и сжатия, получаемого за счет последовательных ударов по мишени с образцом пластин-ударников из материалов с увеличивающейся динамической жесткостью (в), разобщенных во время их движения к мишени. В работе [31] подобрана слоевая система по схеме (б), позволившая уменьшить амплитуду первой УВ до 3 ГПа при многократном ударном сжатии до 50 ГПа органических веществ, имеющих плотность $\sim 10^{-3}$ кг/м³.

При нагружении по схеме (в) [32] реальная картина сжатия усложняется вследствие взаимодействия ударников после отражения от мишени, возможных откольных явлений и т. п. Поэтому для получения действительной картины нагружения профили волн сжатия целесообразно регистрировать манганиновыми датчиками давления [27]. Рисунок 3 поясняет принцип действия схемы (в). В результате плоской детонации заряда взрывчатого вещества УВ распространяется по системе пластин-ударников, например, из меди, алюминия и плексигласа, ударные адиабаты которых изображены в r, u -координатах, где u — массовая скорость вещества за фронтом УВ. При выходе УВ на свободную поверхность пластины из плексигласа получит скорость, близкую к удвоенной массовой скорости плексигласа, поскольку скорость при разгрузке равна массовой скорости; ударники из алюминия и особенно меди будут иметь меньшие скорости. Нагружение мишени с образцом осуществляется последовательными ударами пластин, причем конечное давление будет определяться ударом медной пластины, толщина кото-

рой должна быть больше суммарной толщины алюминиевой и плексигласовой пластины.

Качественный анализ метода показывает, что в зависимости от соотношения динамических жесткостей пластин, их толщин и расстояния от слоевого ударника до мишени (h) могут быть получены различные профили волн сжатия: от монотонно увеличивающегося во времени давления до «пилообразного» профиля с возрастающими по интенсивности импульсами давления. Метод позволяет увеличить время набора давления в крупномасштабных опытах до десяти и более микросекунд. Существенно, что при известном законе затухания УВ в мишени при ударе первым тонким ударником можно выбрать такую геометрию опыта, когда исследуемое вещество на начальной стадии сжатия испытывает воздействие УВ пренебрежимо малой амплитуды.

В силу низкой термической стойкости органические вещества оказались своеобразными «термоиндикаторами», удобными при отработке условий низкотемпературного сжатия. Проведенные сравнительные эксперименты по динамическому сжатию органических веществ с сохранением по схемам рис. 2 a , b , v при одинаковом конечном давлении 50 ГПа и комнатной начальной температуре показали существенное различие в состоянии веществ. Если обычное многократное УВ-сжатие акриламида приводит к его полной термической деструкции, то при сжатии по схемам (б) и (в) деструкция не происходила. Не наблюдалось деструкции и даже структурного перехода в полипропилене. При сжатии по схеме (а) выше 20 ГПа любая исходная структура полипропилена переходит в мелкосферолитную за счет того, что активированный фронтом УВ полимер попадает в условия повышенных остаточных температур.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности обеспечения значительной степени изоэнтропизации в динамических экспериментах.

2. Динамическое изоэнтропическое сжатие конденсированных веществ при низких начальных температурах

Для решения ряда задач, например, металлизации диэлектриков, включая и конденсированные газы, необходимы большие степени сжатия, а для экспериментирования с конденсированными газами — и низкие температуры. Существенно, что температура на изоэнтропе при данной величине сжатия пропорциональна начальной температуре вещества. Поэтому с целью дальнейшего продвижения в область низких температур в динамических экспериментах воздействие изоэнтропическими волнами сжатия осуществляли при исходном охлаждении ампул с исследуемыми веществами вплоть до 4,2 К.

Ниже приведены результаты, полученные при многократном ударном сжатии и ДИС образцов акриламида в медных ампулах сохранения до давления 40 ГПа при начальных температурах 10, 77 и 293 К [17]. После

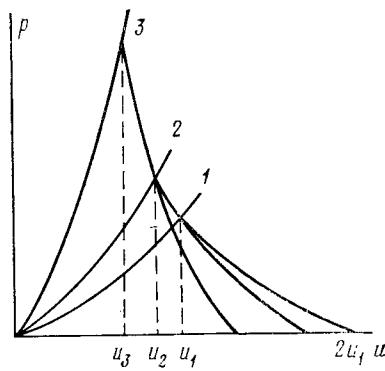


Рис. 3. Ударные адиабаты плексигласа (1), алюминия (2) и меди (3), а также их адиабаты разгрузки в координатах давление — массовая скорость

ТАБЛИЦА 1

Расчетные температуры образца (К) при различных условиях сжатия
($p = 40$ ГПа)

T_0	$T_{\text{дис}}$	$T_{\text{УВ}}$	$T_{\text{ост}}$	$T_{\text{ост}}^*$
10	24	545	320	30
77	124	565	330	90
293	480	765	445	310

* Остаточная температура ампулы.

ТАБЛИЦА 2

Выход полимера (W), концентрация полимерных цепей (N), а также прирост конечной и остаточной температур (ΔT , град = $T - T_0$) в условиях ударного сжатия и ДИС при повышенных начальных температурах

T_0 , К	W , %	$10^{-20} \frac{LN}{\text{кг}^{-1}}$	ΔT_K	$\Delta T_{\text{ост}}$
293	30	УВ 4,7	220	120
293	2	ДИС 1,7	75	0
323	7,5	1,7	135	0
348	13	1,7	170	0

опытов ампулы вновь охлаждали до 77 К с целью фиксации образовавшихся продуктов.

Для понимания условий сжатия образцов при различном характере нагружения и приближенных оценок температур можно воспользоваться данными о сжимаемости плексигласа, имеющего близкую к акриламиду плотность и наиболее подробно исследованного при высоких давлениях. При многократном ударном сжатии, которое реализуется в условиях работы [17], основной нагрев происходит в первой УВ, имеющей амплитуду ~ 8 ГПа, а в последующих волнах сжатие до 40 ГПа можно считать близким к изоэнтропическому. Принималось, что коэффициент Грюнайзена зависит только от объема, а теплоемкость от температуры [33]. В табл. 1 приведены результаты расчетов, которые показывают значительное ослабление нагрева образца при ДИС (особенно при $T_0 = 10$ К) по сравнению с ударным сжатием. Видно также, что при ударном сжатии влияние остаточной температуры заметно ослабевает при $T_0 < 77$ К и значительно понижена остаточная температура стенок ампулы при сжатии с $T_0 = 10$ К.

В результате экспериментов обнаружено существенное различие в выходе полимера акриламида и в интенсивности процесса полимеризации. В результате ударного сжатия акриламида при $T_0 = 10$ К непосредственно в ходе сжатия или же в первые секунды после него образуется 10% полимера. Концентрация растущих полимерных цепей велика, и при размораживании образца до 293 К наблюдается интенсивный процесс полимеризации, в результате чего выход полимера достигает 40%. По-видимому, быстрый отвод тепла от образца к стенкам ампулы (см. табл. 1) способствовал сохранению АЦ. При 77 К выход полимера составляет 30%, и постполимеризация при размораживании не протекает вследствие отжига АЦ в условиях повышенных остаточных температур. Ударное сжатие акриламида при $T_0 = 293$ К привело к практически полной термической деструкции вещества.

В условиях ДИС при $T_0 = 10$ и 77 К выход полимера не превышает 2–3%, и полимеризация при размораживании не происходит из-за недостатка АЦ, что связано с устранением больших градиентов давления во фронте; ДИС при $T_0 = 293$ К приводит к увеличению выхода полимера до 20%, однако термической деструкции не наблюдается. Сравнение приведенных выше результатов, полученных при УВ-сжатии и при ДИС, может свидетельствовать о том, что фронт УВ ответственен за инициирование полимеризации при ударном сжатии.

Исследования по низкотемпературному сжатию газов и включающих их систем были инициированы повышенным интересом к переводу водорода в металлическое состояние. Очевидно, что в этом случае необходимо экспериментировать в области ДИС (рис. 1а). Как уже обсуждалось, методики для реализации таких условий в наших экспериментах созданы на основе использования обычных ВВ. Основная работа проведена с замороженными газами и системами, их включающими, при 77 К. Были разработаны конструкции ампул, позволяющие сохранять указанные объекты после динамического сжатия до 50 ГПа. Сразу после опыта ампулы с исследуемыми веществами вновь охлаждали до 77 К, вскрывали при этой температуре и затем (также начиная с 77 К) проводили изучение физико-химических свойств продуктов.

Были исследованы двуокись углерода, хлор, вода, смесь воды с двуокисью углерода, смесь *n*-гептана с хлором. Для наблюдения изменений в состоянии веществ при низких температурах использован метод радиотермолюминесценции (РТЛ) [34]. Оказалось, что по сравнению с исходными образцами многих веществ, претерпевших сжатие, имеют отличие в спектрах РТЛ. Например, после сжатия CO₂ появляются новые пики на кривой высвечивания. В результате ДИС смесь C₇H₁₆ и Cl₂ теряет способность к быстрой реакции при 153 К в отличие от исходной смеси и т. п.

Основным результатом выполненных до настоящего времени подобных экспериментов следует считать демонстрацию возможности проведения экспериментов с конденсированными газами в динамических условиях сжатия с сохранением продуктов и прямого наблюдения за их свойствами.

3. Динамическое изоэнтропическое сжатие конденсированных веществ при высоких начальных температурах

Отличие ударного сжатия от ДИС состоит в изменении ситуации на переднем участке волн сжатия (рис. 4а, б). В случае ДИС существенно уменьшены микросдвиговые деформации вещества во фронте и развиваемые температуры даже по сравнению с многократным ударным сжатием. Время же воздействия высоких давлений, характер спада давления и степень макропластических деформаций ампулы с образцом при разгрузке в экспериментах, которые будут обсуждаться ниже, практически одинаковы при ударном сжатии и при ДИС.

Выше показано, что в результате ДИС образцов акриламида при $T_0=293$ К не происходит термической деструкции, концентрация АЦ незначительна и постполимеризации не наблюдается. Эти факты уже могут свидетельствовать о том, что фронт УВ ответствен за процесс инициирования и протекания полимеризации при ударном сжатии. Однако само по себе ДИС еще не позволяет разделить роли микросдвиговых деформаций и температурного фактора, поскольку ослабление влияния первых неминуемо уменьшает и температуру веществ за фронтом. Предварительный нагрев вещества при ДИС позволяет достигнуть p, T -условий, тождественных обычному многократному ударному сжатию, но без участия существенных микросдвиговых деформаций, и тем самым выделить влияние фронта УВ в «чистом» виде.

С этой целью было проведено изучение влияния предварительного нагрева в сочетании с ДИС для двух различных по своей природе процессов, протекающих при ударном сжатии: химической реакции полимеризации и структурного превращения графитоподобного нитрида бора (г-BN) в плотную вюрцитоподобную модификацию (в-BN) [35].

Принципиальные схемы экспериментов и идеализированные профили давления приведены на рис. 4а, б. Плоское многократное ударное сжатие до 20 ГПа образцов толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м, помещенных в ампулы осуществляли ударом медной пластины толщиной $7 \cdot 10^{-3}$ м; ДИС до близких давлений (б) осуществляли воздействием слоевых ударников из плексигласа, алюминия и меди, имеющих толщины $1 \cdot 10^{-3}$, $2 \cdot 10^{-3}$ и $7 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. Более детально эксперименты описаны в работе [35].

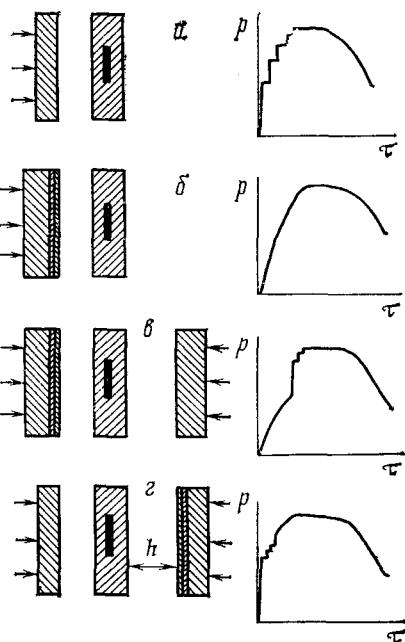


Рис. 4

Рис. 4. Принципиальные схемы нагружения и идеализированные профили волн сжатия: а — многократное ударное сжатие, б — динамическое изоэнтропическое сжатие, в — сочетание ДИС с ударным сжатием, г — сочетание ударного сжатия с ДИС

Рис. 5. Зависимость выхода плотной фазы нитрида бора от начальной температуры; 1 — динамическое изоэнтропическое сжатие, 2 — ударное сжатие

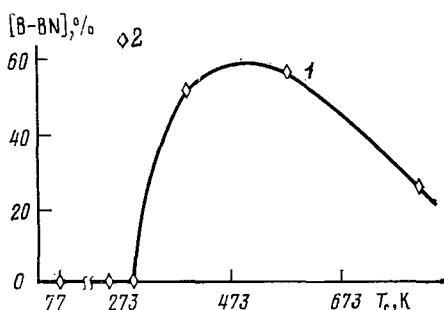


Рис. 5

Полимеризация акриламида. Для процесса полимеризации необходимо наличие АЦ и нагрева, поскольку рост цепи требует энергии активации. При ударном сжатии эти факторы обеспечивает фронт УВ. Как видно из табл. 2, ударное сжатие акриламида при 293 К привело к образованию 30% полимера. Концентрация полимерных цепей при этом составляет $4,7 \cdot 10^{20}$ кг $^{-1}$. Выход полимера в условиях ДИС при 293 К на порядок меньше, а концентрация полимерных цепей меньше примерно втрое и сохраняется при увеличении начальной температуры почти до температуры плавления мономера. Увеличение выхода полимера до 13% связано с ростом остаточной температуры.

Поскольку давление и остаточная температура в условиях ударного сжатия при $T_0 = 293$ К и ДИС при $T_0 = 323$ К близки между собой (температуры получены в тех же предположениях, что и при расчетах данных табл. 1), то образование большей концентрации полимерных цепей в условиях ударного сжатия позволяет сделать вывод об определяющей роли фронта УВ в генерации АЦ и осуществлении реакции полимеризации при ударном сжатии. В рассмотренном случае концентрация АЦ составляет 10^{20} кг $^{-1}$ и образуются они за 10^{-6} с или быстрее, что отвечает исключительно высокой мощности их генерации (10^{26} кг $^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

Превращение г-BN—в-BN. Известно, что ударное сжатие графитоподобного нитрида бора до давлений выше 12 ГПа приводит к его необра-

тимому превращению в плотную вюрцитоподобную модификацию. Высказывались две точки зрения [36, 37]: 1) быстрота перехода обусловлена интенсивными сдвиговыми деформациями и 2) высокая скорость перехода связана с мартенситным характером превращения, переход имеет атермический характер, и для его осуществления достаточно обеспечить достижение требуемого давления.

Появившаяся возможность осуществления почти изоэнтропического сжатия в динамических экспериментах при различных начальных температурах позволяет решить эту альтернативу. Полученные результаты показывают (рис. 5), что если эксперименты проводились при пониженных или нормальной температурах, то замена многократного ударного сжатия на ДИС предотвращает фазовый переход в нитриде бора. В то же время предварительный нагрев образцов оказывается достаточным, чтобы фазовый переход в нитриде бора протекал и при сжатии, близком к изоэнтропическому. Сильный предварительный нагрев образца приводит к частичному отжигу плотной фазы нитрида бора после снятия давления.

Полученные результаты свидетельствуют о том [35], что простого увеличения давления еще недостаточно для осуществления превращения $\text{g-BN} \rightarrow \text{v-BN}$ за времена $\sim 10^{-5} - 10^{-6}$ с. Необходимо и повышение температуры для преодоления заметного активационного барьера.

Около двадцати лет назад, когда появились доказательства возможности структурных превращений веществ при ударном сжатии [52, 53], в литературе указывалось на возможность возникновения УВ в недрах Земли при скачкообразном смещении пород и обусловленного этим образования плотных фаз, что в результате должно приводить к возбуждению землетрясений. Конечно, такие условия могут реализоваться, но вполне вероятно также возникновение и более длительное существование сильных плавных волн сжатия, например, после распада УВ. Учитывая наличие разогрева в земной коре (температура составляет несколько сот градусов на глубинах в сотни километров) и изложенные выше результаты, можно ожидать превращений веществ в больших объемах в недрах Земли не только на расстояниях существования УВ, но и на больших расстояниях, где УВ трансформируется в плавную волну сжатия.

Бриджмен в одной из своих последних статей выразил надежду, что будет разработана методика наложения давления, вызываемого УВ, на предварительно сжатое статическим давлением вещество [38]. Разработка простой схемы создания в динамических экспериментах сжатия, близкого к изоэнтропическому, позволяет осуществить такие условия, когда вещество, сжатое «плавно» с незначительным нагревом (особенно при низких начальных температурах), можно вслед за этим подвергнуть ударному сжатию (рис. 4 ε). Можно создать и другую ситуацию — ударно-сжатое вещество сжимать изоэнтропически (рис. 4 ε).

Современная техника взрывного эксперимента позволяет с большой точностью синхронизировать детонацию одинаковых зарядов ВВ, вызывающую разгон ударников. Необходимые расстояния ударников до мишени (h на рис. 4 ε), например, до ампулы с исследуемым веществом, и давление в ней рассчитываются из анализа p, u -диаграмм по известным ударным адиабатам используемых материалов и скоростям ударников. При малой толщине образца давление в нем за счет отражения УВ будет равно давлению в материале ампулы.

К настоящему времени лобовое столкновение волн сжатия использовано только при ударном сжатии веществ с целью изучения их сжимаемости и электропроводности [39, 40]. Приведенные выше соображе-

ния указывают на то, что при лобовом столкновении могут быть использованы и ударные, и изоэнтропические волны сжатия или их различные сочетания. Другими словами, имеется возможность осуществлять различный контролируемый характер динамического нагружения вещества, а также проследить за изменением его состояния и в ходе сжатия, и непосредственно при анализе сохраненных образцов.

IV. ВЛИЯНИЕ ВОЛН РАЗГРУЗКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

После ударного сжатия образец исследуемого вещества неизбежно испытывает влияние волн разгрузки, снимающих развитые давления и температуры за времена $\sim 10^{-5}$ с. Рассмотрим плоскую схему нагружения, которая дает более простой вариант сжатия образца. В экспериментах с сохранением образец располагают вне зоны разрушающих напряжений, образующейся при взаимодействии встречных волн разгрузки. Поэтому исследуемое вещество испытывает влияние волн разгрузки на участке снятия давления в большинстве случаев до атмосферного. При коротких УВ, генерированных, например, ударом тонкой пластины толщиной 2—3 мм, давление в образце снимается догоняющими волнами разгрузки, следующими со стороны свободной поверхности ударника. Степень макропластических деформаций при умеренных приложенных давлениях в этом случае невелика и составляет 1—2%. При генерации УВ ударом пластины большей толщины или контактной детонацией заряда ВВ ампула с образцом будет иметь и большую остаточную деформацию, доходящую до 10%.

До настоящего времени в литературе нет сведений о том, какие температуры развиваются за счет деформации и могут ли волны разгрузки на участке спада давления до атмосферного давать вклад, например, в создание дефектов или в возникновение структурных превращений вещества. Ниже сделана попытка ответить на эти вопросы на основании сравнительных исследований веществ, испытавших ударно-волновое и динамическое изоэнтропическое сжатия. Воспользуемся для этого результатами, рассмотренными в п. 3 предыдущей главы.

Сравнение результатов, полученных в условиях УВ-сжатия и ДИС образцов акриламида при 293 К (табл. 2), показывает, что совместное действие макропластических деформаций и температур, характеризующих ударное сжатие, приводит к увеличению выхода полимера в 10 раз и количества АЦ (считаем, что концентрация полимерных цепей пропорциональна концентрации АЦ) в ~ 3 раза. На основании этих данных можно сделать вывод о том, что суммарная доля АЦ, образованных в результате влияния волн разгрузки и макропластических деформаций при ударном сжатии, составляет треть от общего числа АЦ. Какая доля АЦ создана разгрузкой, а какая деформациями, в настоящее время определить не представляется возможным. Поскольку при УВ-сжатии и при ДИС характер разгрузки, а также степень макропластических деформаций образцов практически одинаковы, то можно сделать вывод о том, что вклад волн разгрузки в инициирование полимеризации по сравнению с фронтом УВ невелик.

Рассмотрим другой тип превращений — образование плотных фаз при ударном сжатии. Многократное ударное сжатие образцов г-BN до 20 ГПа приводит к образованию плотной фазы в-BN с выходом $\sim 70\%$ (рис. 5). В случае ДИС в интервале начальных температур 77—293 К плотная фаза не образуется даже при намеренно увеличенной степени макропластических деформаций, созданной за счет «вытекания» вещества в свободный объем ампулы.

Превращение г-ВН в плотную фазу при ударном сжатии происходит в интервале давлений 12—20 ГПа и требует наличия высоких температур. Если бы во время снятия давления волнами разгрузки и при начинающихся при этом макропластических деформациях образца в указанной области давлений происходил бы достаточный для превращения нагрев, то в сохраненных после ДИС образцах нитрида бора должна была бы присутствовать плотная фаза. Отсутствие в-ВН свидетельствует о том, что макропластические деформации не привели к необходимому нагреву г-ВН под давлением. Результаты по ДИС при повышенных начальных температурах (рис. 5) показывают, что нагрев вещества в рассматриваемых условиях невелик.

Третий пример заимствован из работы [41], в которой проведено металлографическое исследование монокристаллов меди и поликристаллов никеля и латуни, подвергнутых ДИС, которое в образце трансформировалось в ударное сжатие. Для получения ДИС был использован метод многократно отраженных УВ в прокладке (между пластииной-ударником и мишенью, см. схему рис. 2б) из вещества с малой плотностью — жидкого водорода, который одновременно использовался и как хладоагент. Результаты показали, что в зоне действия ДИС наблюдается уменьшение плотности следов деформации и микротвердости по сравнению с деформационной структурой и микротвердостью в области ударного сжатия.

Рассмотренные примеры влияния волн разгрузки на участке снятия давления до атмосферного позволяют сделать вывод о малости их влияния на образование дефектов в веществе. При использовании плоской схемы нагружения и умеренных давлениях макропластические деформации образцов, возникающие при разгрузке, дают незначительный вклад в конечный остаточный нагрев.

Следует обратить внимание на сообщение [42] об обнаружении и доказательстве индуцирования ударным сжатием фазовых переходов с образованием менее плотных структур, что скорее всего связано с растягивающими напряжениями при разгрузке вещества. Однако остается открытым вопрос, на какой стадии разгрузки такие превращения происходят: или они идут на участке спада давления до атмосферного, или же для их протекания необходимы отрицательные разрывающие напряжения. Результаты работы [42] демонстрируют возможность расширения областей научного и практического применения ударных волн.

V. ПРЯМОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР, РАЗВИВАЕМЫХ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Детонация — это процесс сверхзвукового распространения фронта экзотермического химического превращения по веществу, который способен протекать без взаимодействия с окружающей средой. Согласно гидродинамической теории детонации предполагается, что детонационная волна состоит из ударного фронта, за которым следует зона химической реакции и затем область разлета продуктов детонации. Детонационная волна распространяется с постоянной скоростью вследствие того, что потери энергии УВ непрерывно восполняются энергией, выделяющейся в результате химического превращения новых порций вещества. Прохождение детонационной волны вызывает превращение твердых или жидких химических соединений в смесь газообразных продуктов (CO_2 , CO , H_2O , H_2 , N_2 и др.), имеющих в конце зоны химической реакции плотность $\sim 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Размеры стационарной зоны (a) и время (τ) химической реакции ВВ зависят от ряда факторов, в основном от мощности ВВ и от плотности заряда. Например, при изменении плотности тротила от $1,0 \cdot 10^3$ до $1,6 \cdot 10^3$ кг/м³ значение a изменяется от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-3}$ м и τ — от 0,5 до 0,2 мкс. Давление в конце зоны химической реакции при этом изменяется от 6,5 до 18 ГПа. Для гексогена при изменении плотности от $1,0 \cdot 10^3$ до $1,72 \cdot 10^3$ кг/м³ величина a изменяется от $1,4 \cdot 10^{-3}$ до $0,7 \cdot 10^{-3}$ м, τ — от 0,4 до 0,1 мкс и давление — от 9,5 до 30 ГПа. Приведенные данные получены в работе [43] электромагнитным методом. Температура детонации конденсированных ВВ равна 2000—5000 К (рис. 1, область ДВ).

К настоящему времени опубликовано еще несколько работ, посвященных прямому использованию высоких давлений, температур и продуктов детонации с целью проведения физико-химических превращений путем детонации заряда, состоящего из смеси ВВ и превращаемого вещества. Для сохранения целевых продуктов эксперименты проводились в прочных герметичных контейнерах, выдерживающих давление продуктов детонации.

К таким работам можно отнести синтез кристаллов силикатов из смеси окислов [44], взаимодействие образовавшегося при детонации азота с порошками металлов, в результате чего были синтезированы нитриды алюминия, бериллия, бора, магния и циркония [45], получение окиси, нитрида и карбида бора при взаимодействии бора с продуктами детонации [46]. Возможность осуществления структурных превращений веществ-добавок в рассматриваемых условиях продемонстрирована в работе [47]: при изучении зависимости скорости детонации от плотности смесевого заряда тротила с кварцем обнаружен излом, который был интерпретирован как фазовое превращение кварца.

В связи с приведенными результатами целесообразно провести качественный анализ состояния веществ-добавок в волне детонации. Известны попытки рассмотреть вопросы, связанные с установлением равновесия между частицами инертной добавки и продуктами детонации за время химической реакции, т. е. с выравниванием давления и температуры [48]. Близкие вопросы обсуждались в работе [47] при исследовании влияния добавок алюминия на параметры детонации тротила и в работе [49] при расчете параметров детонационных волн смесей ВВ с инертными добавками. Большое внимание уделено детонации водонаполненных ВВ; показано, что введение воды приводит к увеличению детонационных параметров [50]. Поскольку вода выполняет роль внутренней оболочки, препятствующей разлету продуктов детонации, то увеличивается время протекания химических реакций и происходит более полное выделение энергии. Этот эффект наблюдается только у ВВ с отрицательным кислородным балансом [51].

Рассмотрим состояние частиц-добавок неорганических веществ, имеющих плотность $\sim 2 \cdot 10^3$ кг/м³, близкую к плотности продуктов детонации; при этом учтем результаты работ [48—51] и сведения по ударному сжатию конденсированных веществ. Ввиду близкой плотности во фронте добавка будет испытывать однократное ударное сжатие, и нагрев ее должен происходить за счет сжатия в УВ и пребывания в атмосфере разогретых продуктов детонации. Очевидно, что состояние смеси инертных частиц и плотных газов в детонационной волне определяется в основном временем реакции, физическими свойствами частиц и их размерами. Возьмем средний размер зоны химической реакции равным $a \sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ м и $\tau \sim 10^{-7}$ с. Тогда размер прогреваемых частиц неорганических веществ $l \sim (\lambda \tau)^{1/2}$ составляет $\ll 0,5$ мкм (λ — температуропровод-

ность материала). Установление одинакового давления в продуктах детонации и в частицах добавки можно оценить из времени $\tau_1 \sim l/D$, где D — скорость распространения ударной волны в добавке ($\sim 5 \cdot 10^3$ м/с при 20 ГПа). Тогда в рассматриваемом случае давление будет выравнено при $\tau_1 < \tau$, т. е. при $l < 0,5$ мкм. Таким образом, при размерах частиц добавки $< 0,5$ мкм в гетерогенной зоне реакции детонации должно происходить выравнивание температуры и давления.

Наличие в зоне реакции детонации высоких давлений, температур и химически агрессивных продуктов детонации должно стимулировать различные физико-химические превращения веществ-добавок. Существенно, что скорость охлаждения продуктов детонации [43] и частиц-добавок или же образовавшихся соединений велика и составляет $\sim 10^8$ град/с, как и скорость охлаждения при разгрузке ударно-сжатого вещества. Но отличие состоит в том, что после ударного сжатия вещества в ампулах сохранения образец остывает в уплотненном состоянии, а в продуктах детонации частицы при разлете разобщаются, что должно лучше способствовать закалке и сохранению образовавшихся соединений или структурных изменений веществ-добавок.

Необходимо отметить, что в волнах детонации заметно увеличено время существования высоких давлений и температур по сравнению с процессом ударного сжатия. Можно предполагать, что некоторые превращения могут протекать и при разлете продуктов детонации, когда еще существуют высокие давления и температуры.

В заключение обратим внимание на то, что область детонационных параметров (высокие температуры при относительно небольших давлениях) труднодоступна в экспериментах с УВ. Отметим, что такие параметры могут быть получены при ДИС предварительно нагретых веществ (рис. 1а), однако без специфических условий закалки при разлете продуктов детонации.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что в последние годы с помощью широкого набора методик создания динамических давлений появилась возможность воздействовать на вещество в интервале давлений 10—100 ГПа и более, температур 4,2—10⁴ К, и изучать их состояние после такого воздействия. Представляется важной разработка методик получения в динамических условиях сжатия, близкого к изоэнтропическому, что дало возможность получить большие степени сжатия веществ за счет значительного уменьшения тепловой составляющей давления, присущей ударному сжатию. Применение ДИС при низких начальных температурах впервые позволило провести эксперименты с замороженными газами и с сохранением продуктов сжатия. Показано, что при использовании встречных волн сжатия могут быть созданы условия, когда сжатое изоэнтропически вещество вслед за этим будет подвергнуто ударному сжатию.

Сопоставление результатов, полученных при ударном сжатии и ДИС при высоких начальных температурах, дало возможность прямым экспериментальным путем выявить роль фронта УВ в тех или иных процессах. Показано, что превращение нитрида бора в плотную модификацию может происходить без участия сильных микросдвиговых деформаций, имеющих место во фронте УВ, и является термически активируемым процессом. На примере химической реакции полимеризации доказано, что именно фронт УВ ответствен за этот процесс.

Сравнение результатов исследования ударного сжатия и ДИС, полученных при умеренных давлениях плоского нагружения, позволило сде-

лать вывод, что волны разрежения на участке спада давления до атмосферного не вносят существенного вклада в создание дефектов и в конечный остаточный нагрев вещества за счет макропластических деформаций.

Обнадеживающими являются эксперименты по ударному сжатию систем, включающих газовые компоненты, которые позволили осуществить новые химические синтезы. По-видимому, высокие остаточные температуры переводят значительную часть образовавшихся, а, возможно, и других новых неустойчивых соединений, в исходное состояние. Предварительное охлаждение способствует закалке образовавшихся фаз. В принципе представляется возможным создать условия, приближающиеся к статическим на последней стадии процесса ударного сжатия, т. е. охладить вещество при повышенном остаточном давлении. Для этого нужно, чтобы ампула из прочного материала оказалась загерметизированной после разгрузки. Оценки показывают, что можно сохранить вещество при остаточных давлениях порядка одного и даже более ГПа. Эта задача требует специальных исследований и усложняется при наличии в продуктах сжатия газов.

Показано, что область p, T -диаграммы конденсированного вещества, трудно доступная в экспериментах с УВ (высокие температуры при относительно низких давлениях), может быть реализована путем динамического изоэнтропического сжатия предварительно нагретых образцов исследуемых веществ или же использованием высоких давлений и температур, развивающихся непосредственно в волне детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аврорин Е. Н., Водолага Б. К., Волков Л. П., Владцимиров Л. С., Симоненко В. А., Черноволюк Б. Т. Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 31, с. 727.
2. Агадуров Г. А., Дремин А. Н., Канель Г. И., Першин С. В. Физика горения и взрыва, 1967, с. 281.
3. Холл Г. Успехи физ. наук, 1959, т. 67, с. 705.
4. Альтшуллер Л. В. Там же, 1965, т. 85, с. 197.
5. Кормер С. Б. Там же, 1968, т. 94, с. 641.
6. Solid State Physics, Adv. in Res. and Appl., New York — London: Acad. Press Publ., 1958.
7. Зелдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1963.
8. Минеев В. Н., Иванов А. Г. Успехи физ. наук, 1976, т. 119, с. 75.
9. Высокоскоростные ударные явления. Ред. Николаевский В. Н. М.: Мир, 1973.
10. Физика высоких плотностей энергии. Ред. Крохин О. Н. М.: Мир, 1974.
11. Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1968.
12. Davison L., Graham R. A. Shock Compression of Solids Physics Reports, 1979, v. 55, № 4.
13. Дремин А. Н., Бреусов О. Н. Успехи химии, 1968, т. 37, с. 898.
14. Бацанов С. С. Неорг. матер., 1970, т. 6, № 4, с. 697.
15. Агадуров Г. А., Гольданский В. И., Ямпольский П. А. ЖВХО им. Д. И. Менделеева, 1973, т. 28, с. 80.
16. Duval G. E., Graham R. A. Rev. Mod. Phys., 1977, v. 49, p. 523.
17. Агадуров Г. А., Гольданский В. И., Густов В. В., Долгов А. А., Казакевич А. Г., Мессинев М. Ю., Никольский В. С., Ямпольский П. А. II Всесоюзн. симп. по импульсн. давлениям. Тезисы докл. М., 1976, с. 29.
18. Агадуров Г. А., Густов В. В., Каплан А. М., Косыгин М. Ю., Ямпольский П. А. Физика горения и взрыва, 1972, с. 566.
19. Казакевич А. Г., Мессинев М. Ю., Агадуров Г. А. Химия высоких энергий, 1977, т. 9, с. 376.
20. Агадуров Г. А., Карпухин И. А., Мальцев В. М., Теселкин В. А. V Всесоюзн. совещ. по кинетике и механизму химических реакций в твердом теле. Тезисы докл. Черноголовка, 1978, с. 14.
21. Лузин А. Н. В сб.: Физика импульсных давлений. М., 1979, с. 152.

22. Агадуров Г. А., Дремин А. Н., Канель Г. И. Прикл. механика и техн. физика, 1969, № 2, с. 126.
23. Беляков Г. В. ДАН СССР, 1974, т. 218, с. 1280.
24. Ставер А. М. В сб.: Детонация. Черноголовка, 1978, с. 131.
25. Агадуров Г. А., Гольданский В. И., Густов В. В., Косыгин М. Ю., Ямпольский П. А. I Всесоюзн. симп. по импульсным давлениям. Доклады М., 1976, с. 26.
26. Агадуров Г. А., Долгов А. А., Райнов М. М., Лазарева Е. В., Копанева Л. И., Бачанов С. С. III Всесоюзн. симп. по импульсным давлениям. Тезисы докл. М., 1979, с. 123.
27. Агадуров Г. А. В сб.: Физика импульсных давлений. Тр. ВНИИФТри, вып. 44(74). М., 1979, с. 71.
28. Ямпольский П. А. Вестн. АН СССР, 1975, № 4, с. 41.
29. Альтшулер Л. В., Дынин Е. А., Свидинский В. А. Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 17, с. 20.
30. Hawke R. S., Duerre D. E., Huebel J. G., Keeler R. N., Klapper H. K. Phys. Earth Plane Interior, 1972, v. 6, p. 44.
31. Агадуров Г. А., Густов В. В., Жученко В. С., Косыгин М. Ю., Ямпольский П. А. Физика горения и взрыва, 1973, с. 576.
32. Агадуров Г. А., Жученко В. С., Косыгин М. Ю., Ямпольский П. А. Авт. свид. СССР № 442945, (1974); Бюл. изобр., 1976, № 7, с. 196.
33. Вундерлих Б., Баузэр Г. Теплоемкость линейных полимеров. М.: Мир, 1972.
34. Никольский В. Г., Бубен Н. Я. ДАН СССР, 1960, т. 134, с. 134.
35. Агадуров Г. А., Бавина Т. В., Бреусов О. Н. Физика горения и взрыва, 1981, с. 159.
36. Альтшулер Л. В. В сб.: Детонация, Черноголовка, 1978, с. 119.
37. Курдюмов А. В. Дис. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук, Киев; ИПМ АН УССР, 1976.
38. Бриджмен П. В. сб.: Твердые тела под высоким давлением. М.: Мир, 1966, с. 24.
39. Альтшулер Л. В., Петручин А. П. Ж. техн. физики, 1961, т. 31, с. 717.
40. Набатов С. С., Дремин А. Н., Постнов В. И., Якушев В. В. III Всесоюзн. симп. по импульсным давлениям. Тезисы докл. М., 1979, с. 86.
41. Бордзиловский С. А. Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1977.
42. Бачанов С. С. III Всесоюзн. симп. по импульсным давлениям. Тезисы докл. М., 1979, с. 102.
43. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
44. Michel-Levy B. A. Disc. Faraday Soc., 1949, p. 325.
45. Апин А. Я., Лебедев Ю. А., Нефедова О. И. Ж. физ. химии, 1958, т. 32, с. 819.
46. Пепекин В. И., Махов М. Н., Апин А. Я. Физика горения и взрыва, 1977, с. 135.
47. Дремин А. Н., Покил П. Ф., Арифов М. И. ДАН СССР, 1960, т. 131, с. 1140.
48. Taylor J. W. Detonation in Condensed Explosives, Oxford: Clarendon Press, 1952.
49. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. Физика горения и взрыва, 1970, с. 182.
50. Апин А. Я., Велина Н. Ф. ДАН СССР, 1966, т. 171, с. 399.
51. Ващенко В. И., Матюшин Ю. Н., Пепекин В. И., Апин А. Я. Физика горения и взрыва, 1971, с. 429.
52. Bancroft D., Peterson E. L., Minshall S. J. Appl. Phys., 1956, v. 27, p. 291.
53. Дремин А. Н., Агадуров Г. А. ДАН СССР, 1959, т. 128, с. 261.

Институт химической физики АН СССР, Москва