

ПРЕДВЗРЫВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ БЫСТРОМ ИНИЦИИРОВАНИИ БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ (ОБЗОР)

В. И. Таржанов

РФЯЦ, ВНИИ технической физики, 456770 Снежинск, tar@gdd.ch70.chel.su

Выполнен обзор экспериментальных работ, касающихся изучения предвзрывных явлений при ударно-волновом и лазерном инициировании бризантных взрывчатых веществ. Проведено обсуждение основных результатов работ с позиции установления сходства и различия процессов при этих способах инициирования. Предложены подходы к развитию исследований обсуждаемых явлений.

Ключевые слова: быстрое инициирование, предвзрывные явления, бризантные ВВ, оптические характеристики ВВ.

Анализ предвзрывных явлений как деталей механизма самораспространяющейся реакции разложения взрывчатого вещества (ВВ) проводился в самых ранних работах по детонации [1–3]. Однако экспериментальное изучение этих явлений долго сдерживалось недостаточным временным разрешением диагностической аппаратуры. Только с освоением субмикросекундного, а затем и наносекундного диапазонов разрешений открылась возможность регистрации названных явлений в реальном масштабе времени. Неудивительно поэтому, что при большой истории качественных описаний систематические количественные результаты появились лишь в 90-х годах [4–10].

К настоящему времени получен большой объем экспериментальных данных по предвзрывным явлениям в азидах тяжелых металлов при лазерном инициировании [8–10]. Данные по электропроводности и люминесценции, полученные с использованием скоростных методов импульсного радиолиза и фотолиза, позволили Э. Д. Алукеру и Б. П. Адуеву с соавторами рассмотреть взрывное разложение азидов «на языке» физики твердого тела и сделать важные выводы о механизме элементарного акта и цепной природе процесса [11]. Изучение ранних твердофазных стадий развития взрыва открывает новые возможности применения подходов физики твердого тела к технологии твердых ВВ. Например, контролируемое создание дефектов решетки и деформаций кажется перспективным средством успешного решения

вопросов безопасности, старения и обращения с ВВ [12].

Началось изучение предвзрывных явлений и в бризантных (вторичных) ВВ, являющихся гораздо более сложными объектами исследования в сравнении с азидами металлов. В связи с накоплением значительного объема информации представляется целесообразным сделать краткий обзор исследований в данной области. Цель обзора — выявить сходство и различие предвзрывных явлений в инициирующих (первичных) и бризантных (вторичных) ВВ, указать на общность явлений при ударно-волновом и лазерном инициировании бризантных ВВ, обратить внимание на возможные подходы в исследовании этих явлений в бризантных ВВ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Горение и детонация исследуются уже более 100 лет, однако до сих пор существует значительный разброс в терминологии. Связано это с множественностью разветвлений в исследованиях и многочисленностью технических применений этих процессов. Например, можно отметить два крупных направления в изучении детонации — исследование газовой детонации и детонации конденсированных систем. Первое связано с запросами промышленной взрывобезопасности, второе — с большой практической значимостью конденсированных ВВ в горных работах и в военном деле. В связи со сказанным необходимо привести термины и определения, используемые в обзоре.

Предвзрывные явления — термин, широко

Работа выполнена в рамках проекта № 2180 Международного научно-технического центра (г. Москва).

используемый в работах [8–11] применительно к процессам, протекающим при иницировании азидов тяжелых металлов. Он определяет явления, регистрируемые в реальном масштабе времени на начальной стадии развития взрыва, до существенного изменения состояния ВВ (в [8–11] — до его механического разрушения) и существенного энерговыделения. Хотя понятие «взрыв» охватывает все происходящие процессы, все же понятие «предвзрывные явления» можно ввести как самостоятельное, поскольку рассматриваемые явления реализуются и могут регистрироваться без взрыва, когда подаваемая при иницировании энергия недостаточна для его развития. То есть взрыв всегда включает предвзрывные явления, а предвзрывные явления не обязательно развиваются до взрыва.

Взрыв — весьма широкое понятие. Согласно [13] это процесс быстрого физического или химического превращения системы, сопровождающийся переходом ее потенциальной энергии в механическую работу.

Детонация во взрывчатом веществе — сверхзвуковое самоподдерживающееся распространение химической экзотермической реакции разложения вещества.

Иницирование — тоже широкое понятие, однако на сегодняшний день в применении к ВВ оно означает иницирование (принудительное возбуждение) в нем детонации. Для принудительного возбуждения горения ВВ и в русской, и в англоязычной литературе применяется термин «*зажигание* (ignition)». Об этом следует сказать, поскольку, во-первых, некоторые исследователи применяют термин «зажигание» расширительно, включая в него и иницирование детонации. Во-вторых, целесообразно, все же разделять эти понятия, так же как разделяют понятия «детонация» и «горение» («дефлаграция») в связи с различием в них механизмов переноса энергии.

Понятие «*быстрое иницирование*» введено в [14] автором обзора как режим иницирования, при котором к концу энерговода границы возникшего в пространстве ВВ макроочага иницирования (области внешнего энерговода) движутся со сверхзвуковой скоростью. К быстрому иницированию можно отнести иницирование ВВ ударной волной, электровзрывом мостика, электрической искрой, мощными импульсами лазерного или корпускулярного излучения.

БЫСТРОЕ ИНИЦИРОВАНИЕ БРИЗАНТНЫХ ВВ

Хотя данный обзор касается в основном явлений, наблюдаемых при лазерном иницировании бризантных ВВ, коснемся кратко еще и ударно-волнового иницирования. Это целесообразно сделать в связи с некоторой общностью процессов, наблюдаемых при иницировании разными способами.

При всех способах иницирования необходимо разрушить твердое ВВ, т. е. превысить его предел упругости. Даже при механическом иницировании на копрах ВВ не способно поглощать энергию удара в упругой области нагружения [15]. То же наблюдается при ударно-волновом и лазерном иницировании.

Ударно-волновое иницирование

Имеется обширная литература по физике ударно-волнового иницирования. Достаточно посмотреть материалы международных симпозиумов по детонации.

Чтобы показать сложность и многостадийность процессов при ударно-волновом иницировании детонации, перечислим их в соответствии с [16]. Превышение предела упругости вещества сопровождается перестройкой его исходной структуры. Диссипация энергии реализуется на неоднородностях новой структуры в так называемых горячих точках [3]. Элементарные процессы поглощения энергии — диссипативные, кумулирующие и трансляционные — приводят к воспламенению (выделению химической энергии) очагов. Как только создаются условия для суммирования энергии элементарных процессов, формируется генеральная направленность процесса, возрастает роль газодинамики, развитие процесса приобретает коллективный характер.

Неоднородность упруговязкопластического течения твердого вещества при ударно-волновом нагружении общепризнана. Ведутся широкие исследования разрушения твердого тела при деформации. Феноменологически разрушение — это зарождение, рост и коалесценция микроскопических пор и трещин [16]. На стадии зарождения велика роль дислокаций [17, 18].

В последнее десятилетие начато исследование микроскопических механизмов возникновения упомянутых выше горячих точек. Уже

ранние расчеты ударно-волнового инициирования ВВ с использованием методов молекулярной динамики указывали на ключевую роль процессов, происходящих на ширине ударного фронта [19]. Рассматриваются механизмы с возбуждением электронных состояний [20]. А. Н. Дремин и его коллеги в своей модели детонации [21] постулировали, что детонация обусловлена диссоциацией молекул в пределах ударного фронта, которая может протекать через механизмы накопления, тепловой ионизации или электронного возбуждения.

Электронные возбуждения в последние годы привлекают к себе все большее внимание исследователей. Так, в [12] обнаружены корреляции ударной чувствительности с деталями электронной структуры ВВ. Рассматривалось сужение запрещенной зоны ВВ при сжатии на фронте волны [22]. В [23] предложена новая экситонная модель инициирования детонации, в которой расчетами электронной структуры гексогена обнаружены локальное сужение запрещенной зоны вблизи дислокаций и дополнительное сужение зоны при сжатии в ударном фронте, приводящее к существенному повышению вероятности электронного возбуждения (образованию экситона) и разрыву химической связи N—NO₂.

Нельзя не сказать о медленно признаваемой научной общественностью концепции физической кинетики (микрокинетики) Уокера [24–26]. Ударно-индуцируемая химическая реакция в ВВ описывается в ней как неравновесный нетепловой процесс. Скорость реакции определяется средней колебательной скоростью пар свободных атомов (радикалов), возникающих при разрушении молекул за время $10^{-14} \div 10^{-12}$ с. Столь быстрое разрушение молекул связано с «когерентностью» кинетической энергии молекул в их поступательном движении на ширине ударного фронта. Эта модель серьезно поддерживается новыми молекулярно-динамическими расчетами Тревино [27]. Близки к этой концепции и воззрения А. Н. Дремина [21]. Родственная микроскопическая модель детонации предложена в [28], где фронт распространяется передачей взаимодействия с известными частотами характеристических колебаний от молекулы к молекуле при элиминировании функциональных групп N и NO₂.

Таким образом, в изучении предвзрывных явлений при ударно-волновом инициировании

ВВ достигнут существенный прогресс. В возникновении горячих точек в веществе велика роль дислокаций. Ключевым звеном на твердотельной стадии процесса являются электронные возбуждения.

Лазерное инициирование

Появление в 1950-х годах нового инициирующего воздействия — светового импульса — вызвало большой интерес в связи с возможностью «чистого» нагрева вещества и точного определения энергии, необходимой для взрыва. Начало исследованиям инициирования первичных ВВ светом, а следовательно, и изучению предвзрывных явлений положили Берхтольд, Мееркемпер и Эггерт (см. [3]), использовавшие в качестве источника света газовый разряд. Позже Росс [29] подробно изучал инициирование азидов свинца светом ударной волны в аргоне. Первыми открытыми публикациями по лазерному инициированию бризантных ВВ были работы А. А. Бриша, Б. Н. Зайцева и И. А. Галеева с коллегами [30–32]. Несколько позже были опубликованы работы американских исследователей Яня и Меничелли [33–35], хотя заявки на патенты, касающиеся лазерного инициирования [36, 37], появились раньше. В 1970-е годы Е. И. Александров с сотрудниками начал подробное исследование лазерного инициирования азидов свинца [38]. Первое теоретическое рассмотрение воздействия лазерного излучения на бризантные ВВ, по-видимому, сделано Харрахом [39]. К настоящему времени библиография по лазерному инициированию содержит более 100 источников (см., например, [40]).

Известно несколько способов лазерного инициирования:

— прямое лазерное инициирование, когда лазерный импульс направляется непосредственно на поверхность или внутрь заряда ВВ [30, 32, 40–42];

— инициирование ВВ с примесями, сильно поглощающими лазерное излучение [31, 32, 40, 43];

— инициирование ВВ с помощью взрываемой светом металлической пленки на его поверхности [33, 34, 44];

— инициирование ВВ микролайнером (фольгой), разогнанным продуктами светового взрыва тонкого слоя вещества-аблятора [45].

Все названные режимы инициирования — многостадийные, со специфичными механизмами каждой стадии.

Уже в 1976 г. в работе [39] были выделены два различных режима взаимодействия излучения с ВВ — тепловое зажигание и импульсное инициирование. В первом режиме плотность мощности 1 кВт/см^2 или менее, длительность лазерного импульса около 1 мс или более. Во втором режиме плотность мощности примерно на шесть порядков больше, а длительность импульса меньше при одной и той же энергии.

При инициировании детонации выделено три группы факторов, определяющих интенсивность ввода энергии и быстрого нагрева вещества [42, 14]. Первая группа — это параметры лазерного импульса: длина волны, длительность импульса, распределение плотности энергии по сечению пучка. Вторая группа — параметры ВВ: его формула, плотности монокристалла и исследуемого заряда, дисперсность, оптические характеристики, химические константы. Третья группа — параметры, определяющие геометрию воздействия на ВВ и его окружение: диаметр пучка и его форма, прозрачная оболочка или ее отсутствие.

Оптические характеристики бризантных ВВ при лазерном инициировании. Оптическими характеристиками определяется при инициировании (по крайней мере, на начальной стадии лазерного воздействия) распределение в ВВ плотности поглощенной энергии, а следовательно, температуры и давления. Оптические характеристики — это коэффициенты отражения и поглощения (R и A), а также показатели ослабления, рассеяния и поглощения (ε , σ и k), определяющие полностью мутную (или дисперсную) среду [46].

Для бризантных ВВ спектры поглощения в ближнем ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах волн получены в основном в растворах [47–49]. Имеются данные по коэффициентам отражения и поглощения монокристаллов тэна, октогена и гексанитротильбена [50, 51]. Ультрафиолетовая граница поглощения этих ВВ расположена около 300 нм. В видимом диапазоне отсутствуют какие-либо особенности, в инфракрасном имеются характерные пики поглощения. Эти пики идентифицированы, они связаны с характеристическими колебаниями молекул веществ. Определены функциональные группы атомов ВВ, способные уходить (элиминировать) из мо-

лекул при увеличении амплитуды колебаний [52, 53].

Поскольку в технических устройствах применяются поликристаллические, а часто и порошкообразные ВВ, то знание их оптических характеристик также необходимо. Отрывочные сведения по коэффициентам отражения порошкообразных октогена и тэна приведены в [54].

В [55] изложены результаты систематического исследования оптических характеристик тротила, тэна, гексогена и октогена. Измерения коэффициентов отражения и суммы коэффициентов отражения и пропускания тонких слоев ВВ проводились с использованием метода фотометрического шара [56]. Получено, что в диапазоне толщин слоев от $0,01 \div 10$ мм и дисперсностей порошков $1600 \div 22000 \text{ см}^2/\text{г}$ при их плотности $0,9 \text{ г/см}^3$ коэффициент отражения R растет, а коэффициент пропускания T падает для всех дисперсностей при увеличении толщины слоя. Коэффициент поглощения A при этом растет от 0,06 до 0,2. Насыщение зависимостей $R(\delta)$ и $T(\delta)$ к постоянным значениям $0,8 \div 0,94$ и нулю соответственно достигается при толщинах слоев $\delta = 0,3 \div 4$ мм, своих для каждой дисперсности. Вычислены показатели поглощения, рассеяния и ослабления. По зависимости показателя поглощения от дисперсности может вычисляться показатель поглощения монокристалла ВВ. Для тэна и тротила, например, он получен равным $0,12$ и $2,4 \text{ см}^{-1}$ соответственно. Показатели рассеяния и ослабления исследованных ВВ лежат в диапазоне $500 \div 7700 \text{ см}^{-1}$ при изменении дисперсности от 1430 до $22000 \text{ см}^2/\text{г}$. Сделан вывод об объемном характере поглощения в тротиле и о поверхностном — в тэне. Поверхностное поглощение связано с дефектами решетки и примесями, количество которых увеличивается с ростом дисперсности ВВ. Приведена методика расчета распределения поглощенной энергии по глубине полупространства ВВ.

В [51] для порошкообразного тэна с плотностью $0,9 \text{ г/см}^3$ приведены данные по зависимости коэффициента отражения от длины волны света в диапазоне $250 \div 1000$ нм и от угла рассеяния в интервале $90 \div 160^\circ$. Из этих данных следует, что исследуемый тэн является практически ламбертовым отражателем.

Таким образом, можно констатировать, что к настоящему времени получен полный набор данных по оптическим характери-

кам бризантных ВВ. Такой набор позволяет рассчитывать пространственно-временные распределения плотности энергии внутри ВВ на начальной линейной стадии взаимодействия его с лазерным излучением.

Предвзрывные явления при прямом лазерном инициировании. Уже в первых работах по лазерному инициированию бризантных ВВ были отмечены явления, наблюдавшиеся при вводе в ВВ энергии, близкой к пороговой энергии инициирования, но не приводившей к возникновению детонации. Это такие явления, как визуально наблюдаемая в темноте вспышка на поверхности ВВ, образование кратера (каверны), изменение коэффициентов отражения и поглощения ВВ [31, 32]. В [39] при теоретическом анализе лазерного инициирования рассматривался процесс самосогласованной абляции, при котором поглощение энергии осуществляется горячим ионизированным паром ВВ.

Кратерообразование в зарядах порошкообразных тэна, тротила, гексогена при воздействии лазерного импульса сквозь контактирующие с ними стеклянные пластины подробно изучено в экспериментах [5]. Образование кратеров наблюдается при вводе в ВВ энергии E , большей критического значения E^* . Критическая энергия кратерообразования зависит от диаметра области воздействия излучения d , дисперсности (удельной поверхности) S и типа ВВ: чем меньше d и выше S , тем ниже E^* для данного ВВ; E^* не зависит от плотности ВВ в диапазоне $0,9 \div 1,4$ г/см³. Размер кратера при фиксированных d и S растет с увеличением подаваемой в импульсе энергии от значения E^* до энергии, при которой изучаемое ВВ инициируется. Зависимости размера кратера от E для тротила, тэна, гексогена дисперсностью $3000 \div 4000$ см²/г являются кубическими параболоми. Поскольку такими же параболоми описывается камуфлетный взрыв [57], можно считать, что размер получаемых в названных ВВ кратеров определяется только энергией лазерного импульса. В тэне с более высокой дисперсностью (22000 см²/г) рассматриваемые зависимости линейны, что указывает на возможность вклада химической энергии разложения ВВ в образование кратера. Кратерообразование в гексогене и тэне изучалось микрофотографически в [4].

Снижение светопропускания тонких слоев тэна двух дисперсностей зарегистрировано в [5] параллельно с кратерообразованием при

увеличении подаваемой на ВВ энергии лазерного импульса в диапазоне от E^* до энергии инициирования. Такое снижение говорит о том, что в поверхностном слое ВВ вблизи контактирующей с ним стеклянной пластины возникает зона сильного поглощения при $E > E^*$. Форма лазерных импульсов, пропущенных тонкими слоями тэна, отличается от формы импульса падающего излучения. Импульс, пропущенный слоем ВВ, укорочен, при этом точка начала среза импульса смещается к началу импульса с ростом подаваемой энергии.

Снижение коэффициента отражения мелкодисперсного тэна плотностью ≈ 1 г/см³ наблюдалось в [31] при энергиях, несколько меньших энергии инициирования. Авторы [31] связали наблюдаемое снижение с фазовым превращением ВВ.

Согласно работе [42] оптический пробой диэлектрика — тэна — при $E \geq E^*$ проявляет себя в описанных явлениях кратерообразования в ВВ и резком изменении его оптических характеристик. Первопричина визуально наблюдаемой вспышки и изменения оптических характеристик — фотоионизация ВВ в поверхностном слое, обусловленная наличием примесных и поверхностных уровней в запрещенной зоне. Высокой дисперсностью ВВ, связанной с развитой поверхностью и высокой степенью искаженности кристаллической структуры (множество точечных дефектов и дислокаций), обусловлен низкий уровень оптической прочности ВВ по сравнению со сплошным веществом. В [42] при микроскопическом обследовании состояния внутренней поверхности стеклянной пластинки над кратером были обнаружены мелкие капли расплава и «морозные» узоры сконденсировавшегося испаренного тэна. Это свидетельствует о плавлении и испарении ВВ в области воздействия излучения, однако эти явления могут быть вторичными, реализующимися при прогреве вещества на границе с плазменной зоной оптического пробоя, а также при рекомбинации плазмы.

Понятно желание исследователей подробно зарегистрировать кинетику термораспада бризантных ВВ при быстром инициировании, однако имеются значительные трудности, связанные с малой длительностью процессов (субмикросекундный диапазон). Выполнено множество работ по прямой регистрации газообразных продуктов разложения в миллисекундном диапазоне. Регистрация в них велась

прямым отбором проб продуктов и их анализом с помощью времяразрешающих масс-спектрометров с быстродействием до сотни сканов в секунду. Обзор таких работ сделан в [53]. Весьма важной представляется работа [4], в которой исследовалось разложение монокристаллического образца гексогена при воздействии на него импульса эксимерного (KrF) лазера длительностью 20 нс при плотности энергии 5 Дж/см². В этой работе помимо времяпролетных масс-спектрометров использовались фотоумножители для фиксации фотонной эмиссии. Вблизи облучаемой поверхности ВВ обнаружено более десятка нейтральных и ионизированных функциональных групп (NO₂, NO, HCN, CN и др.) всего лишь за 40 мкс. Зарегистрирована фотонная эмиссия в ближней ультрафиолетовой и видимой областях с задержками относительно лазерного импульса от 200 нс до 1,2 мкс. С увеличением плотности энергии лазерного импульса наблюдалось появление возбужденных нейтральных частиц, идентифицируемых как NO в долгоживущем электронно-возбужденном состоянии.

Следует упомянуть работу [58] с инфракрасной идентификацией молекулярных состояний ВВ в условиях алмазной тигельной ячейки при давлениях до 20 ГПа и температурах до 100 °С. Эти условия близки к реализующимся при ударно-волновом инициировании бризантных ВВ. Зарегистрированы аномалии в скорости горения ТАТБ и тэна при лазерном зажигании, связанные со структурным превращением при повороте молекулы (для тэна) на 60° вокруг оси C и группы CH₂ONO₂ на 180° вокруг связи C—C. С этим же превращением связаны особенности ударно-волнового инициирования.

Обратим внимание на существование противоречия в экспериментальных данных. По [4, 23] электронные возбуждения в ВВ приводят к разрыву химической связи N—NO₂, т. е. к началу разложения ВВ. Данные же по лазерному инициированию [42] свидетельствуют о реализации в первую очередь оптического пробоя, в ходе которого нужно поглотить еще около 99 % всей необходимой для инициирования энергии. Объяснение этого противоречия может быть таким. В [4, 23] изучаются плотные малодефектные ВВ. Оптическая прочность таких ВВ достаточно высока, и более вероятным процессом при ударно-волновом или лазерном воздействии может быть разрыв химической связи. В [42] же исследуются порош-

кообразные высокодисперсные ВВ с огромной дефектностью кристаллической структуры на чрезвычайно развитой поверхности множества очень мелких кристаллов ВВ. В этом случае начальная концентрация локальных уровней в запрещенной зоне вещества столь велика, что более вероятным процессом при инициирующем воздействии становится оптический пробой. Конечно же, эта гипотеза требует экспериментального подтверждения.

Таким образом, можно констатировать, что изучение предвзрывных процессов в бризантных ВВ началось. Необходимо, очевидно, переходить в наносекундный диапазон времен регистрации для изучения самых первых, «запускающих» твердофазных стадий разложения. Весьма интересным является вопрос о конкурентности процесса разрыва химической связи при электронных возбуждениях и процесса оптического пробоя ВВ при инициирующем воздействии.

ОБ ОТЛИЧИИ ПРЕДВЗРЫВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ АЗИДОВ МЕТАЛЛОВ И БРИЗАНТНЫХ ВВ

Поглощение света при лазерном инициировании бризантных пористых ВВ является двухстадийным процессом. На первой (допробойной) стадии наблюдается его линейность относительно мощности излучения и оптические характеристики ВВ неизменны. Оценка [42] показывает, что на первой стадии поглощается только около 1 % всей поглощаемой за импульс энергии. Вторая стадия (пробойная и послепробойная) существенно нелинейна. Коэффициент отражения падает, эффективная глубина проникновения излучения в ВВ уменьшается, рассеяние света резко уменьшается вследствие сильного увеличения показателя поглощения ВВ.

Если предвзрывное поглощение энергии в азидах металлов до их механического разрушения сопровождается цепной химической реакцией их разложения с соответствующим химическим энерговыделением (в силу простоты молекулы ВВ) [11], то в бризантных ВВ (с их сложными молекулами) вводимой на аналогичной стадии энергии, по-видимому, недостаточно для разрыва имеющихся и установления новых связей в молекуле. Единственным следствием такого энерговода в ВВ может быть стилирование в нем оптического пробоя. То есть

основными предвзрывными процессами в бризантных ВВ, ведущими к химическому энерговыделению, являются процессы в плазменной стадии.

В свете сказанного выше о возможной конкурентности процессов разрыва химической связи при электронных возбуждениях и оптического пробоя весьма важным представляется исследование предвзрывных явлений в малодфектных монокристаллах бризантных ВВ. При этом размеры образцов ВВ и методика исследования могут быть идентичны применяемым в [11] при изучении предвзрывных явлений в азидах металлов.

Следует напомнить еще и о том, что для инициирования детонации в ВВ необходимо запустить химическую реакцию разложения ВВ в достаточно большом объеме вещества. Этот объем характеризуется таким химико-газодинамическим параметром ВВ, как критический диаметр ВВ, которым определяется баланс между химическим энерговыделением и газодинамическими потерями при расширении вещества. Иницирование ВВ из областей воздействия излучения с размером, меньшим критического диаметра, требует существенно больших плотностей энергии, чем инициирование из больших областей [14, 42]. Это говорит о том, что химическая реакция может быть запущена в малом макроочаге инициирования, но детонация не возникнет. Таким образом, к предвзрывным явлениям в строгом смысле этого определения должна быть отнесена и сама химическая реакция.

ОБ ОБЩНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТАДИЙ ПРЕДВЗРЫВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ И ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

Из сказанного выше следует, что появляется все больше доводов в пользу ключевой роли электронных возбуждений во взрывном разложении ВВ при ударно-волновом воздействии. Но и при лазерном воздействии (по крайней мере, на азиды металлов [11]) электронные возбуждения являются пусковым звеном твердотельной реакции разложения. Такая общность понятна: и при ударно-волновом, и при лазерном воздействии реализуются состояния вещества с высокими давлением и температурой. Различие чисто количественное: в первом случае состояние лежит на ударной адиабате, во

втором — на адиабате Пуассона или на изоохоре (при расположении ВВ в жестком окружении) либо на изобаре (например, для кристаллов с очень маленькими размерами). Различны только соотношения между давлением и температурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В изучении предвзрывных явлений при быстром инициировании ВВ достигнут существенный прогресс.

В частности, ведутся широкие исследования разрушения твердого тела при ударно-волновых воздействиях. Разрушение ВВ — это стадия в процессе его инициирования, необходимая для последующего эффективного ввода энергии. Установлено, что разрушение вещества носит локальный характер. Диссипация энергии реализуется в так называемых горячих точках. На стадии зарождения таких точек велика роль дислокаций или скоплений дислокаций. Ключевым звеном на твердотельной стадии процесса являются электронные возбуждения. Локальное сужение запрещенной зоны вблизи дислокаций при сжатии резко увеличивает вероятность электронного возбуждения и разрыва химической связи $N-NO_2$.

При прямом лазерном инициировании бризантных ВВ также изучена стадия их разрушения — кратерообразование. Установлено существование порога кратерообразования. Показано, что на пороге наблюдается резкое изменение оптических характеристик ВВ, которое проявляет себя через срезание задней части лазерного импульса. Только 1 % необходимой для инициирования энергии поглощается на первой, допороговой, линейной относительно мощности излучения твердотельной стадии процесса. Это пороговое явление трактуется как оптический пробой ВВ. При энергиях выше порога реализуется плазменная стадия процесса.

Высказана гипотеза о возможной конкурентности процессов — оптического пробоя ВВ и его химического разложения. Проявление одного из механизмов может определяться степенью дефектности (пористостью, дисперсностью) ВВ и, очевидно, его реакционной способностью.

Предвзрывные явления в бризантных ВВ, таким образом, более многостадийны по сравнению с таковыми в азидах металлов. Целесообразно изучение как твердотельной, так и плазменной стадии. Исследование первой из

стадий возможно с использованием метода импульсного радиолиза, эффективность которого показана при изучении азидов металлов. Вторая стадия должна исследоваться с варьированием степени дефектности кристаллов ВВ в свете названной выше гипотезы о конкурентности процессов. Нельзя забывать о том, что при работе с образцами ВВ, размеры которых меньше его критического диаметра, химическое разложение вещества не будет приводить к взрыву, и, следовательно, само может быть отнесено к предвзрывным явлениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К. К., Харитон Ю. Б. Некоторые соображения о механизме самораспространяющихся реакций // Докл. АН СССР. 1934. Т. 1. С. 402–404.
2. Беляев А. Ф. Возникновение детонации взрывчатых веществ под действием теплового импульса // Докл. АН СССР. 1938. Т. 18. С. 267–270.
3. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых веществах. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
4. Dickinson J. T., Jensen L. C., Doring D. L., Yee R. Mass spectroscopy study of products from exposure of cyclotrimethylene trinitramine single crystals to KrF excimer laser radiation // J. Appl. Phys. 1990. V. 67, N 8. P. 3641–3651.
5. Зинченко А. Д., Сдобнов В. И., Таржанов В. И. и др. Лазерное воздействие на пористое ВВ без его иницирования // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 97–101.
6. Рябых С. М., Долганов В. С. Критерий возбуждения взрывного разложения азидов серебра импульсом излучения // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 87–90.
7. Александров Е. И., Сидонский О. Б., Ципилев В. П. Влияние выгорания в окрестности поглощающих включений на процесс лазерного зажигания конденсированной среды // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 3. С. 7–12.
8. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Белокуров Г. М., Кречетов А. Г. Предвзрывная проводимость азидов серебра // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62, № 3. С. 203–204.
9. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г. Предвзрывная люминесценция азидов серебра // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22, № 16. С. 24–27.
10. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Белокуров Г. М. и др. Взрывное разложение азидов тяжелых металлов // ЖЭТФ. 1999. Т. 116, № 5(11). С. 1676–1693.
11. Захаров Ю. А., Алукер Э. Д., Адуев Б. П. и др. Предвзрывные явления в азидовых тяжелых металлов. М.: ЦЭИ «Химмаш», 2002.
12. Kuklja M. M., Aduев B. P., Aluker E. D., et al. Electron excitation role by explosive destruction of solid bodies // J. Appl. Phys. 2001. V. 89, N 7. P. 4156–4166.
13. Физика взрыва / Ф. А. Баум, А. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Челышев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
14. Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы детонации: Сб. науч. ст. / Под ред. В. И. Таржанова. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998.
15. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
16. Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Изд-во МГУ, 1990.
17. Bowden F. P. and Singh K. Irradiation of explosives with high-speed particles and the influence of crystal size on explosion // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1954. V. 227. P. 22.
18. Dick J. J., Mulford R. N., Spencer W. J., et al. Shock response of pentaerythritol tetranitrate single crystals // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. P. 3572–3587.
19. Karo A. M., Hardy J. R., and Walker F. E. Theoretical studies of shock-initiated detonations // Acta Astronaut. 1978. N 5. P. 1041.
20. Williams F. Electronic states of solid explosives and their probable role in detonations // Adv. Chem. Phys. 1971. V. 21. P. 289.
21. Дремин А. Н. К теории детонации // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 12. С. 22–40.
22. Gilman J. J. Mechanochemistry // Science. 1996. V. 274. P. 65.
23. Kuklja M. M., Stefanovich E. V., Kunz A. B. An exitonic mechanism of detonation initiation in explosives // J. Chem. Phys. 2000. V. 112, N 7. P. 3417–3423.
24. Walker F. E. Physical kinetics // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. P. 5548–5554.
25. Уокер Ф. Е. Сравнение классической и современной теории детонации // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 12. С. 47–67.
26. Walker F. E. Support growing for a new kinetics of shock-induced processes // Proc. 16th Symp. on Explosives and Pyrotechnics. April 29 — May 1, 1997, Interplay Danville, Calif.
27. Rice V. M., Mattson W., Grosh J., Trevino S. F. Molecular-dynamics study of detonation. A comparison with hydrodynamic predictions // Phys. Rev. E. 1996. V. 53, N 1. P. 611–622.
28. Поздняков А. В. Вычисление скорости детонации // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 96–105.
29. Roth J. Initiation of lead azide by high-intensity light // J. Chem. Phys. 1964. V. 41, N 7. P. 1929–1936.
30. Бриш А. А., Галеев И. А., Зайцев Б. Н. и др. Возбуждение детонации конденсированных

- ВВ излучением оптического квантового генератора // Физика горения и взрыва. 1966. № 3. С. 132–133.
31. **Галеев И. А., Зайцев Б. Н.** Об отражательной способности ВВ // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 3. С. 447.
32. **Бриш А. А., Галеев И. А., Зайцев Б. Н. и др.** О механизме инициирования конденсированных ВВ излучением ОКГ // Физика горения и взрыва. 1969. Т. 5, № 4. С. 475–480.
33. **Yang L. C. and Menichelli V. J.** Detonation of insensitive high explosives by Q — switched ruby laser // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 19, N 11. P. 473.
34. **Yang L. C., Menichelli V. J. and Earnest J. E.** Laser initiation of explosive devices // National Defense Magazine. 1974. V. 58, N 322. P. 344.
35. **Yang L. C. and Menichelli V. J.** Laser initiation of insensitive high explosives // Proc. 6th Symp. (Intern.) on Detonation / D. J. Edwards (Ed.). Arlington, VA: Office of Naval Research, 1976. P. 612–621.
36. **Pat. USA. No. 3,362,329.** Laser detonator / S. Epstein. Filed December 10, 1963.
37. **Pat. USA. No. 3,528,372.** Explosive detonating device / D. J. Lewis, De Rey Marina, F. H. Gardner. Filed Sept. 8, 1967.
38. **Александров Е. И., Вознюк А. Г.** Иницирование азидов свинца лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 4. С. 86–91.
39. **Harrach R. J.** Estimates on the ignition of high-explosives by laser pulses // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. P. 2473–2482.
40. **Bourn N. K.** On the laser ignition and initiation of explosives // Proc. Roy. Soc. Lond. A. 2001. V. 457. P. 1–26.
41. **Волкова А. А., Зинченко А. Д., Санин И. В. и др.** Временные характеристики инициирования тэна лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 760–766.
42. **Таржанов В. И., Зинченко А. Д., Сдобнов В. И. и др.** Лазерное инициирование тэна // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 113–119.
43. **Иоффе В. Б., Долголаптев А. В., Александров В. Е., Образцов А. П.** Воспламенение аллюминийсодержащих конденсированных систем лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 51–55.
44. **Таржанов В. И., Зинченко А. Д., Смирнов Б. Н. и др.** Иницирование тэна с помощью взрывающей светом металлической пленки // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 2. С. 111–116.
45. **Paisley D. L.** Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives // Shock Compression in Condensed Matter / S. C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbes, and D. G. Tasker. (Eds). Elsevier, 1991. P. 825–828.
46. **Шифрин К. С.** Рассеяние света в мутной среде. М.: Гостехиздат, 1951.
47. **Priester F., Halik M., Castelli A., Fredericks W.** Analysis of explosives using infrared spectroscopy // Anal. Chem. 1960. V. 32, N 4. P. 495–508.
48. **Энергетические конденсированные материалы.** М.: Янус-К, 1999.
49. **Беллами Л.** Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
50. **Данные Деба в [3].**
51. **Paisley D. L.** Prompt detonation of secondary explosives by laser // Proc. 9th Symp. (Intern.) on Detonation. Arlington, VA: Office of the Chief of Naval Research, 1989. P. 492–499.
52. **Химическая энциклопедия.** М.: Больш. Рос. энцикл., 1992. Т. 3. С. 305–306.
53. **Ермолин Н. Е., Зарко В. Е.** Механизм и кинетика термического разложения циклических нитраминов (обзор) // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 3. С. 10–31.
54. **Александров В. Е., Долголаптев А. В., Иоффе В. Б., Левин Б. В.** Воспламенение пористых систем лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 1. С. 58–61.
55. **Зинченко А. Д., Погребов А. И., Таржанов В. И., Токарев Б. Б.** Оптические характеристики некоторых порошкообразных ВВ // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 80–87.
56. **Иванов А. П.** Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969.
57. **Механический эффект подземного взрыва / В. Н. Родионов, В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др.** М.: Недра, 1971.
58. **Foltz M. F.** Pressure dependences of the burn rate of PETN at high pressure // Proc. of Symp. on Energetic Materials. Pleasanton, USA, 1994.

Поступила в редакцию 27/1 2003 г.