

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 ИНИЦИИРОВАНИЕ 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 Н 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].