На правах рукописи

Jucet

Александр Сергеевич Скрипин

ЛАЗЕРНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ БРОНИРОВАННОГО ТЕТРАНИТРАТА ПЕНТАЭРИТРИТА МОНОИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

01.04.17 — Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск — 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	Владимир Папилович Ципилев доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Ханефт Александр Вилливич, доктор физико- математических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВПО Кемеровский государственный университет, профессор кафедры теоретической физики
	Павленко Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, заведующий лабораторией физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт углехимии и химического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 24 декабря 2014 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.269.13 при ФГАОУ ВО НИ ТПУ в аудитории 217 учебного корпуса ТПУ № 8 по адресу: ул. Усова, 7, г. Томск, 634050, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Научно-технической библиотеки ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте http://portal.tpu_ru/council/2803/worklist

http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist

Автореферат разослан 23 октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, канд. тех. наук

А. С. Матвеев

Актуальность работы. Лазерное инициирование горения и взрыва является в настоящее время стандартным лабораторным способом подрыва взрывчатых и горючих веществ. Благодаря высокой яркости и направленности излучения с его помощью можно осуществить подрыв любого BB — твердого, жидкого, взрывоопасной газовой смеси.

Однако, несмотря на продолжительные исследования (~50 лет), практическое применение настоящего способа инициирования до сих пор не реализовано, исключая [1, 2]. Одной из важных причин этого является, повидимому, отсутствие единых представлений о лазерном инициировании взрывчатых веществ и единых моделей этого процесса. Трудности, связанные с разработкой таких моделей вызваны большим количеством разнообразных процессов, которые необходимо принимать во внимание рассеяние и интерференция излучения в порошках ВВ, неоднородный нагрев за счет примесей различного характера, конвективные процессы и сложная кинетика разложения вещества.

В настоящее время существует и развивается множество гипотез лазерного инициирования ВВ, причем все большее внимание уделяется вторичным — тэну, ТАТБ, октогену и пр. Однако в большинстве случаев к ним применяются модели, разработанные для простейших инициирующих ВВ (азидов тяжелых металлов), что недопустимо. Практически все вторичные ВВ обладают реальной температурой плавления, испаряются, реагируют в газовой фазе, что не присуще инициирующим ВВ и не может быть проигнорировано. Образование паров ВВ, их диффузионный и газодинамический перенос представляют основной интерес для настоящей работы.

Целью работы является экспериментальное исследование лазерного инициирования вторичных взрывчатых веществ на примере тетранитрата пентаэритрита (тэна) в условиях максимального подавления газодинамических эффектов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Осуществляется лазерное моноимпульсное (~15 нс) инициирование тэна при бронировании — прессованием и удержанием в сборках под давлениями, превышающими предел прочности тэна.

2. На основании результатов решения предыдущей задачи исследуется изменение чувствительности тэна к смене длины волны лазерного излучения в диапазоне «область прозрачности — коротковолновое поглощение»;

3. Исследуется устойчивость к лазерному излучению тэна, содержащего различные концентрации поглощающей примеси, минимальным образом искажающей кинетику и энергетику реакций разложения тэна (УДП сажи), при различных давлениях прессования и выдержки заряда.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые показано, что изменяя условиях эксперимента, можно добиться пороговых энергий инициирования вторичных BB, сопоставимых с аналогичными у первичных.

Численные значения пороговых энергий плотностей энергий И инициирования позволяют эффективно оценивать вероятность реализации различных механизмов лазерного инициирования. Обнаружено и объяснено, почему даже в условиях подавления газодинамической разгрузки в поры заряда и через облучаемую поверхность энергия инициирования продолжает уменьшаться. Найдено объяснение влиянию поглощающих примесей на устойчивость ВВ при различных давлениях прессования. Показано, что изменение длины волны в области прозрачности не влияет на устойчивость тэна, а в области поглощения матрицы эффект определяется рассеивающими и поглощающими свойствами ВВ.

По результатам работы сформулированы следующие защищаемые положения:

1. В условиях максимального подавления газодинамической разгрузки удержания предела прочности) (давление больше рост намного чувствительности тэна обусловлен просветлением образца И соответствующим ростом размеров очага инициирования;

2. В рамках гипотезы о формировании в тэне макроочага разложения за счет усреднения энергии по световому ореолу, результаты инициирования тэна на длинах волн диапазона «область прозрачности — коротковолновое поглощение» объясняются различиями в распределении пространственной освещенности по объему заряда.

3. Уменьшение чувствительности тэна с поглощающими примесями при больших давлениях прессования связано с уменьшением размеров очага инициирования и, следовательно, увеличением относительных теплопотерь из него.

Достоверность полученных результатов следует из корректности и обоснованности ставившихся использования многократно задач, апробированных лазерному методик проведения эксперимента по инициированию, анализу экспериментальных данных в рамках классических представлений о тепловом взрыве, сопоставлению новейших результатов работ, полученных в рамках альтернативных представлений об исследуемом процессе.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что полученные данные будут служить основой для разработки более адекватных моделей инициирования тэна. Описание условий, в которых были получены эти результаты, возможно, сузят разнообразие используемых методик, что позволит в дальнейшем корректно сравнивать между собой результаты разных экспериментальных исследований. Также экспериментальные данные могут послужить отправной точкой для новых дискуссий понятия «чувствительность BB».

В практическом смысле результаты работы наглядно демонстрируют, что более безопасные в обращении вторичные ВВ могут заменить первичные без больших потерь эффективности инициирования. Разумеется, сфера их применения будет ограничена требованиями по быстродействию. Также данные задают нижний предел по энергиям к лазерным установкам для испытаний взрывчатых веществ.

Личный вклад автора заключается в совместном с соавторами и коллегами постановке целей исследования. Результаты, изложенные в автореферате и диссертации, получены автором лично. Обсуждение задач исследований, методов их решения и результатов проводилось совместно с соавторами. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые положения, сделаны выводы по работе.

Апробация работы. Результаты исследований, обобщенных и изложенных В настоящей работе, докладывались на 14-й И 15-й международной конференции по радиационной физике и химии твердых тел (2009 г., Астана, Казахстан; 2012 г., г. Томск, Россия), Международном семинаре "EuroPyro — 2012" (Франция), 16-й международной конференции по радиационным эффектам в диэлектриках (2011 г., Пекин, КНР), Международной конференции «Актуальные проблемы физики и техники» (2012 г., г. Саранск, Россия). Материалы работы вошли в отчеты по контрактам № 0706T/DIR и № 1003T/DIR (с КАЭ Франции), № П517 и № 14.B37.21.0273 (ФЦП «Научные научно-педагогические И кадры инновационной России на 2009 – 2013 гг.»).

Публикации по теме работы. Всего результаты исследований изложены в 16 публикациях, из них 7 — журналы из списка ВАК и приравненных к ним («Известия ТПУ», «Известия вузов. Физика», «Письма в журнал технической физики», «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B»).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка цитируемой литературы из 137 наименований. Работа изложена на 123 страницах, содержит 1 таблицу и 21 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и определены задачи работы, описана научная новизна, сформулированы защищаемые положения, обоснована достоверность результатов работы, их практическая и теоретическая значимость, описан личный вклад автора, апробация работы, указано количество публикаций, подробно раскрыта структура диссертации.

В первой главе приведен развернутый литературный анализ появления и развития различных представлений и моделей лазерного инициирования первичных и вторичных взрывчатых веществ.

Необходимость вынесения анализа в отдельную главу обусловлена отсутствием в настоящее время единых представлений о развитии взрыва вплоть до оспаривания основных положений классических теорий [3]. Во многих представлениях игнорируются реальные оптические свойства ВВ, вносятся значительные упрощения в кинетику разложения. Разнообразие представлений усугубляется разными подходами к проведению экспериментальных работ, не позволяющих сравнивать результаты исследований, полученных разными группами исследователей.

В главе дан обзор существующих моделей лазерного инициирования, проанализированы экспериментальные условия, и физические упрощения, в рамках которых были получены экспериментальные результаты. По его результатам анализа сформулированы основные методические подходы к постановке эксперимента, его проведению и обсуждению результатов.

Во второй главе приведено подробное описание экспериментального комплекса, описание первой серии опытов (влияние давления прессования и удержания тэна на пороговые энергии инициирования) и обсуждение полученных результатов.

Опыты проводились на лазерном комплексе, позволяющем проводить синхронные многопараметрические измерения с временным разрешением порядка 1 нс и точностью синхронизации измерительных каналов порядка 5 нс. Основой комплекса является неодимовый гранатовый лазер LQ-929 («Солар ЛС») с тремя генераторами высших гармоник (основная — 1064 нм; высшие — 532 нм, ~355 нм, 266 нм). Профиль лазерного пучка на всех гармониках оставался квазиколоколообразным.

Лазерные пучки направлялись в единую оптическую схему, отражательные элементы которой заменялись в соответствии с используемой длиной волны. Лазерное излучение разделялось кварцевой призмой Дове на три пучка — отражение от передней грани использовалось для облучения образцов, внутреннее отражение от задней грани (выходящее через боковую сторону призмы) использовалось для осциллографирования, пропускание направлялось на измеритель энергии (ИКТ-1Н, ИМО-2Н или QE25). Схема деления предоставлена на рис. 1 (сл. стр.).

На этом же рисунке предоставлена схема формирования пучка на поверхности ВВ. Для этого центральная часть пучка вырезалась круглой диафрагмой, изображение которой строилось на поверхности объективом. Таким образом контролировался размер пучка в экспериментах (1 мм), распределение энергии в нем (близкое П-образому с точностью 10 %), энергия конкретного возбуждающего импульса.

Регистрация свечения осуществлялась фотомодулями H5773 в обратном ходе лучей проекционной схемы (рис. 1), а также сбоку от образца (традиционным образом). Также использовался дифференцирующий акустический датчик [6], показания которого отождествлялись с началом разложения.

Осуществлялось инициирование 12-миллиграмовых навесок тэна в сборке многократного использования с всесторонним бронированием. Порошок насыпался в специальную прессформу: диаметр полированного пуансона был равен 3 мм, обечайки — 30 мм. Вместо второго пуансона образец поджимался к стеклянной или кварцевой пластине толщиной 10 мм, через которую осуществлялось инициирование. Большая толщина стекла

6

позволяла осуществлять прессование и удержание образцов под давлениями в несколько тонн на квадратный сантиметр без потери герметичности.





Сборка помещалась в гидравлический пресс, куда был встроен датчик давления, и поджималась в нем давлениями до 6,0 т/см². В случае расспрессовки деформаций и трещин на элементах сборки не наблюдалось.

Основной целью опыта было получение порогов инициирования в условиях максимального подавления газодинамических эффектов, основными из которых являются разгрузка очагов разогрева по температуре и давлению в поры вещества и через облучаемую поверхность. С этой целью опыты проводились при давлениях прессования, превышающих предел прочности тэна (560 кгс/см²).

Основные результаты опыта (пороговые энергии инициирования) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Пороги инициирования тэна на разных длинах волн

2,0 T/cm ²	4,0 T/cm ²	6,0 т/см ²
2 900 мкДж	390 мкДж	470 мкДж
370 мДж/см ²	50 мДж/см ²	60 мДж/см ²

Задержки вспышки составили 4 – 10 мкс.

Было установлено, что в момент облучения образца возникает короткое по длительности свечение (рис. 2). Опыты показали, что свечение регистрируется как при бронировании, так и при отсутствии защитного стекла. Зарегистрированная зависимость амплитуды свечения от энергии лазерного импульса, спектр свечения и его временная форма не позволили однозначно его идентифицировать. Однако его связь с механизмом инициирования маловероятна, ввиду малой продолжительности, значительного временного интервала от свечения взрыва. При энергиях воздействия ≥ 3 мДж на облучаемой поверхности образовывались неглубокие кратеры.



Рис. 2. Осциллограмма, получаемая при инициировании бронированного тэна (1 — сигнал из зоны воздействия, 2 — сигнал со всего образца, 3 — сигнал акустического датчика, 4 — лазерный импульс)

Ha основании простейших оценок, а также известных экспериментальных данных по иным ВВ показано, большинство механизмов, подразумевающих гомогенное поглощение энергии, не может объяснить полученные в эксперименте низкие пороги инициирования. В то же время показали, что пробой в поле световой волны (в рамках оценки предположения равенства критической напряженности поля в постоянном режиме и для частоты ~10¹⁵ Гц) возникает уже при

$$H \ge E_{\kappa\rho}^2 \cdot t_{\mu\nu\rho} / 120\pi (1+\rho) \approx 2,0 \text{ мДж/см}^2,$$

где H — плотность энергии падающего пучка, $E_{\rm kp} = 5,0$ кВ/см — критическая напряженность электростатического поля для пробоя тэна [4], $t_{\rm имп} = 10$ нс — длительность импульса, $\rho = 0,8$ — коэффициент отражения прессованного тэна. Однако эти представления в работе не развивались как по причине отсутствия альтернативных данных об электрической прочности тэна, так и

той, что дальнейшие опыты косвенно ее опровергают (опыт по изменению длины волны, добавлению примесей).

Таким образом, обосновано можно предполагать лишь то, что заметное изменение состояния тэна реализуется на локальном уровне — при облучении тэна лазерное излучение поглощается субмикронными примесями, присутствующими в тэне как продукт его частичного разложения либо как посторонняя примесь. В формируются результате высокотемпературные очаги разогрева, вызывающие плавление, частичное разложение и конвекцию тэна в своей окрестности. В результате этих процессов образуется единая зона разогрева, из которой и начинается инициирование.

Именно формированием единой зоны разогрева объясняется кратерообразование при действии на небронированный тэн.

Однако сама по себе эта модель не способна объяснить невозможность инициирования небронированного тэна, а также снижение энергий инициирования с ростом давления в указанном пороговых диапазоне. Показано, что к этому не приведет ни изменение пористости, ни прочности при сжатии, ΗИ достижение адиабатической изменение температуры разложения. Однако с ростом давления отмечается уменьшение рассеивающих характеристик ВВ — увеличение размеров ореола рассеяния, что наводит на следующее качественное описание процесса. Поэтому реалистичными кажутся следующие представления.

С ростом давления прессования (в условиях опыта — от 1,6 г/см³) плотность образцов тэна приближается к плотности кристалла (1,78 г/см³). Механизм этого заключается в непрерывной деформации порошинок BB, которой способствует высокое давление, превышающее предел прочности и, следовательно, текучести тэна. Этот процесс сопровождается увеличением площади соприкосновения порошинок, «выдавливанием» пузырьков воздуха из объема и, следовательно, уменьшением рассеивающих свойств.

Вследствие этого в тэне формируется ореол рассеяния больших размеров, чем ранее. При этом можно показать, что до определенного момента освещенность в ореоле меняется незначительно. Для доказательства этого было рассчитано рассеяние фотонов в диффузной среде методом Монте-Карло по алгоритмам, аналогичным [5]. Результаты расчета предоставлены на рис. 2. Они были выполнены в приближении постоянного показателя поглощения, что позволило построить графики простым масштабированием характерного пробега фотонов в расчетах. Приведенная на графике величина альбедо (Λ) по сути задает соотношение между вероятностью поглощения и рассеяния излучения в веществе.



глубина полубесконечного слоя, усл. ед.

Рис. 2. Изменение потока излучения в диффузно рассеивающей среде с различным альбедо однократного рассеяния (Л)

Для приведенных на рис. 2 значений Л видно, что изменение потока излучения в объеме среды невелико (~10 %), в то время как глубина проникновения увеличивается почти в 3 раза. Таким образом, размеры светового ореола последствии, макроочага инициирования И. В опережающим образом растут над уменьшением его «светонасыщенности». В дополнение отметим, что даже при бронировании облучаемой поверхности для любого BB существует Z_{кр} — критическая глубина залегания очага инициирования, обусловленная возможностью разгрузки через неидеальный контакт «ВВ — стекло — обечайки». Увеличение глубины прогрева способствует выполнению условия Z > Z_{кр} и обуславливает более высокую вероятность инициирования.

Такая качественная картина инициирования подтверждается также наблюдением гистерезиса давления прессования на тэне [8]. Подробно эти результаты обсуждаются в главе 4 вместе с опытом по влиянию поглощающих примесей на инициирование BB.

В третьей главе описаны эксперименты по инициированию тэна, находящегося под давлением 5,0 т/см² при изменении длины волны излучения, эксперименты по инициированию тэна с поглощающими примесями сажи, приведено подробное обсуждение результатов.

Эксперименты с инициированием на разных длинах волн, являются эффективным способом проверки не только предложенной во второй главе гипотезы, но и многих других, для которых длина волны излучение имеет принципиальное значение — фотохимические, где с длиной волны связана эффективность генерации электрон-дырочных пар, и пробойные, где энергия кванта излучения влияет на порог пробоя.

Образцы тэна были подвергнуты действию всех четырех гармоник лазерного излучения — 1064 нм, 532 нм, 354,7 нм и 266 нм. В первой серии опытов исследовались закономерности свечения, возбуждаемого в небронированном тэне. Результаты этих исследований в виде зависимости амплитуды свечения от энергии импульса приведены на рис. 3.



плотность энергии (H), мДж/см²

Рис. 3. Зависимость амплитуды свечения тэна в момент облучения от лазерной энергии (обведенные точки соответствуют кратерообразованию)

Из графика видно, что зависимости эти качественно отличаются. Для длины волны 1064 нм амплитуда свечения зависит от 4-й степени плотности энергии лазерного импульса, на длине волны 532 нм — первой степени и лишь при плотности энергии > 1 Дж/см² становится сильно нелинейной. Пропорциональность отклика образца плотности энергии подразумевает, что наблюдается люминесценция образца. Для проверки этого предположения были сняты спектры свечения на указанных длинах волн с использованием малогабаритного спектрографа S100 с волоконным входом («Солар ЛС»). Результаты изменений предоставлены на рис. 4 (сл. стр.).

Видно, что свечение на 1064 нм возбуждается практически во всем видимом диапазоне длин волн, однако не имеет сплошного характера, позволяющего связать его со свечением нагретого тела или плотной плазмы. В последнем случае возникнет вопрос, что именно превращается в эксперименте в плазму — тэн, абсорбированная грязь или нечто иное.



Рис. 4. Спектры излучения тэна, возбужденного на разных длинах волн

Спектр свечения, возбуждаемого на длине волны 532 нм, отличается тем, что не содержит «коротковолновых» компонент — все излучение лежит в области длин волн > 532 нм. Однако оно не может являться люминесцентным, поскольку ширина запрещенной зоны тэна равна ~3,8 эВ, а существование полос поглощения в видимой спектральной области в тэне не доказано.

Возбуждение свечения на длинах волн 354,7 нм и 266 нм исследовалось только по амплитудным значениям. Особое внимание следует обратить на непропорциональность роста амплитуды свечения изменению плотности энергии даже на длине волны 266 нм, что позволяет окончательно исключить из рассмотрения люминесцентную природу свечения.

Образование кратеров, по-видимому, связано с тем, что действующие потоки излучения более чем на порядок превышают пороговые для инициирования и поглощающие микрочастицы разогреваются до очень высоких температур. Плавя и испаряя тэн с высокой скоростью, тепловая волна достигает незащищенной поверхности, с которой начинается интенсивный газоотвод.

Понятно, что и в этих условиях не удалось осуществить инициирование тэна и пришлось прибегнуть к бронированию. Выбранное давление прессования (5,0 т/см²) было выбрано исходя из результатов, полученных в главе 2. Результаты экспериментов предоставлены в таблице 2.

Таблица 2. Пороги инициирования тэна на разных длинах волн

1064 нм	532 нм	354,7 нм	266 нм
470 ± 110 мкДж	430 ± 110 мкДж	720 ± 315 мкДж	94 ± 31 мкДж
60 ± 15 мДж/см ²	55 ± 15 мДж/см ²	90 ± 40 мДж/см ²	12 ± 4 мДж/см ²

Отметим, что первые две длины волны лазерного излучения попадают в спектральную область прозрачности ВВ, длина волны 354,7 нм находится близко к краю поглощения (по данным [9]) и излучение 266 нм эффективно поглощается тэном. Также добавим, что при воздействии на бронированные образцы излучением 532 нм амплитуда свечения в момент воздействия была сопоставима с амплитудой сигнала, отождествляемого со взрывным разложением. Осциллограмма инициирования тэна на этой длине волны предоставлена на рис. 5.



Рис. 5. Инициирование тэна на длине волны 532 нм (1 — сигнал свечения из зоны воздействия; 2 — сигнал свечения со всего образца; 3 — сигнал датчика давления; 4 — лазерный импульс)

Задержки вспышки во всех случая составляли несколько микросекунд (4 – 8 мкс). Установить корреляцию величины задержки вспышки с длиной волны не удалось.

Близость пороговых энергий инициирования тэна на 1-й м 2-й гармониках при близких оптических свойствах (высокие коэффициенты отражения, слабое поглощение) позволяют предполагать одинаковые механизмы их инициирования. Этот результат также говорит против связи процессов, обуславливающих свечение в начальный момент времени, с механизмом лазерного инициирования

Обращают на себя внимание два момента — двукратное уменьшение чувствительности на длине волны 354,7 нм, а также ее пятикратное увеличение на длине волны 266 нм. В целом ситуация, по мнению автора, складывающаяся картина корректно описывается следующим образом.

Механизм инициирования на 532 нм описывается аналогично тому же, как и на 1064 нм. Длина волны 354,7 нм находится близко от края «собственного поглощения» тэна, что говорит о высоком показателе поглощения. По данным измерений В. И. Олешко (отчет CEA/DAM no. 1003T/DIR) показатель поглощения на этой длине волны составляет 1 – 2 см⁻¹, что на два порядка выше, чем на 1064 нм. В результате увеличение потока излучения на этой длине волны существенно меньше, освещенность

поглощающих неоднородностей меньше (по расчетам методом Монте-Карло — почти в 1,5 раза в максимуме). В результате для инициирования тэна на 354,7 нм требуются большие энергии.

Инициирование на длине волны 266 нм отличается тем, что очаг разогрева формируется непосредственно поглощенным излучением, а не в результате диффузии тепла из отдельных микронеоднородностей. В результате механизм инициирования практически полностью совпадает с аналогичным для азидов тяжелых металлов (см. «Основные публикации по теме работы», [3]).В то же время большое время задержки взрыва говорит о более сложной кинетике разложения, которая, однако, выходит за рамки вопросов, обсуждаемых в настоящей диссертации.

Проведение опытов с поглощающими примесями обусловлено результатами экспериментов предыдущей главы, где показано, что коэффициент поглощения взрывчатого вещества влияет на особенности формирования микроочагов разогрева и, в последствии, макроочага инициирования.

В качестве поглощающей примеси использовался УД порошок сажи ПМ-75. Полагалось, что аморфный углерод является одним из продуктов разложения тэна, поэтому минимальным образом изменит кинетику его разложения, чего нельзя гарантировать при добавлении УДП металлов [5], особенно алюминия.

Пороговые энергии инициирования бронированного тэна с различной концентрацией сажи предоставлены в таблице 4.

	0,0 % масс.	0,1 % масс.	1,0 % масс.
2,0 т/см ²	370 мДж/см ²	250 мДж/см ²	200 мДж/см ²
4,0 т/см²	50 мДж/см ²	80 мДж/см ²	73 мДж/см ²
6,0 т/см ²	60 мДж/см ²	80 мДж/см ²	100 мДж/см ²

Таблица 4. Пороги инициирования тэна с разным содержанием УДП сажи

Нетрудно увидеть следующую тенденцию: при «невысоких» давлениях прессования добавление поглощающих примесей приводит к очувствлению ВВ, в то время как при больших давлениях наоборот, пороговые энергии начинают расти. Этот экспериментальный факт следующим образом согласуется с уже приводимыми представлениями.

При малых давлениях введение поглощающих примесей увеличивает коэффициент поглощения тэна за счет введения новых центров поглощения. Это принципиальным образом отличает механизм действия примесей от перехода к длине волны 354,7 нм, где коэффициент поглощения также велик. В результате средняя температура макроочага, сформированного введением примесей, выше, чем при смене длины волны.

Повышение давления приводит к увеличению объемной концентрации поглощающих включений на фоне увеличения свободного

пробега излучения. В результате резко падает освещенность включений в объеме образца, сокращаются размеры очага инициирования. Это сокращение тем выше, чем выше концентрация поглощающих примесей.

Отметим также, что введение примеси изменяет теплофизические свойства вещества — теплоемкость, теплопроводность. Так, к примеру, теплопроводность сажи (1,14 $Bt \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$) почти на три порядка выше аналогичной у тэна (0,002 $Bt \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$). Добавим, что теплоемкость сажи ниже, чем у тэна, что приводит к более эффективному плавлению последнего, конвективному отводу тепла.

Полученные в настоящей главе данные (пороговые энергии W_{05}) нанесены на график [6]. Результат нанесения предоставлен на рис. 6.





На рис. 6 пунктирными линиями обозначены экспериментальные линии гистерезиса давления, говорящие о том, что именно прессование тэне создает изменения, обуславливающие его высокую чувствительность к лазерному излучению. Наглядно видно, что полученные в работе пороги инициирования ниже, чем полученные ранее, однако также малы по порядку величины.

В качестве перспективных опытов по итогам настоящей главы и ранее приведенных исследования представляются следующие: зависимость пороговой энергии инициирования от диаметра пучка в УФ-области (размерный эффект), который должен точнее установить механизм диффузии тепла из области поглощения лазерного излучения. Не менее важным изучение когерентности является влияния лазерного излучения на устойчивость BB, вторичных которая наглядно позволит продемонстрировать роль образования локальных очагов инициирования.

1. Получены минимальные из известных пороги инициирования тэна в условиях всестороннего бронирования. Их численные значения меньше оценочных, получаемых в рамках «гомогенных» теорий инициирования.

2. Задержки срабатывания тэна в эксперименте исчисляются единицами микросекунд, что говорит о сложной кинетике превращения этого ВВ. Это существенно ограничивает рамки применения математических моделей, разрабатываемых для тэна (в которых задержки «срабатывания» исчисляются сотнями наносекунд).

3. Результаты опытов по влиянию давления прессования не связаны с изменением пористости и газопроницаемости тэна, изменением его прочностных характеристики, адиабатическим разложением. Процессы, объясняющие такое поведение тэна составляют суть первого защищаемого положения.

4. Связь инициирующей способности излучения с коэффициентом поглощения в тэне неоднозначна и зависит от механизма поглощения. Это подтверждается сравнением опытов по инициированию тэна на длине волны 354,7 нм и с добавлением поглощающих примесей.

5. Сильнопоглощающееся излучение формирует в тэне тепловой очаг в приповерхностном слое, что полностью аналогично формированию теплового очага в первичных ВВ и подтверждается экспериментально — пороги инициирования азида серебра и тэна одинаковы на длине волны 266 нм.

6. На уменьшение чувствительности тэна с поглощающими примесями под большими давлениями влияет сильное увеличение теплопроводности и уменьшение теплоемкости, вызванное добавлением сажи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. А. С. Скрипин — К вопросу о преддетонационном участке взрывного разложения азидов тяжелых металлов — И. Ю. Зыков, А. В. Разин, Е. Ю. Морозова, А. С. Скрипин, В. П. Ципилев // Известия вузов. Физика. — 2013. — т. 56, № 7/2. — с. 65–70

2. A. Skripin – "Mechanism of the hot centers formation in PETN monocrystals at the explosion initiation by high-current electron beam" – V. Oleshko, V. Lisitsyn, V. Lysyk, A. Skripin, V. Tsipilev; Russian Physics Journal, vol. 55, no. 11/3, p. 151 – 153 (2012)

3. A. Skripin – "Dependence of explosion initiation threshold of PETN with absorptive additives on uniforn compression pressure of the sample" – V. Ovchinnikov, A. Skripin, V. Tsipilev, A. Yakovlev; Russian Physics Journal, vol. 55, no. 11/3, p. 217 - 219 (2012)

4. A. Skripin – "Spectral Dependence of the Initiation Threshold of Explosive Decomposition in AgN3" – V. Lisitsyn, E. Morozova, A. Skripin, V. Tsipilev;

Nuclear Instruments and Methods in Physic Research B, no. 286, pp. 141 – 147 (2012)

5. А. С. Скрипин — Электрический пробой и взрывное разложение монокристаллов тетранитрата пентаэритрита при облучении электронным пучком — В. И. Олешко, В. М. Лисицын, А. С. Скрипин, В. П. Ципилев // Письма в журнал технической физики. — 2012. — т. 38, вып. 9. — с. 37 – 43

6. А. С. Скрипин — Лазерное инициирование порошков тэна в условиях объемного сжатия — В. П. Ципилев, Е. Ю. Морозова, А. С. Скрипин // Известия Томского политехнического университета. Энергетика. — 2010. — т. 317, № 4. — с. 149 – 155

7. А. С. Скрипин — Кинетические характеристики процесса взрывного разложения азидов тяжелых металлов при лазерном импульсном возбуждении — А. С. Скрипин, В. П. Ципилев. // Известия вузов. Физика. — 2009. — т. 52, № 8/2. — с. 316 – 319

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Laser initiated ordnance system (LIOS) » Ensign-Bickford Aerospace & Defence Company [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <u>http://www.eba-d.com/products/laser-initiated-ordnance-system-lios-2/</u>, свободный (дата обращения 23.07.14)

2. Laser Ordnance Systems & Devices | Pasific Scientific [Электронный pecypc]. — Режим доступа: <u>http://www.psemc.com/product-families/laser-ordnance-devices/</u>, свободный (дата обращения 23.07.14)

3. Б. П. Адуев, Э. Д. Алукер и др. Распространение цепной реакции взрывного разложения в кристаллах азида серебра // Физика горения и взрыва. — 2002. — т. 39, № 6. — с. 104 – 106

4. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ, 2-е изд. — Л: Химия, 1973. — 638 с.

5. Е. И. Александров, В. П. Ципилев. Особенности светового режима в объеме полубесконечного слоя ДРС при освещении направленным пучком конечной апертуры // Известия вузов. Физика. — 1988. — № 10. — с. 23 – 29

6. В. П. Ципилев. Лазерное инициирование тэна // в сб. «Физикохимические процессы в неорганических материалах»: тезисы докладов конференции. — Кемерово, 2001. — с. 113 – 114