

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ОБОЛОЧЕЧНЫМИ ВЗРЫВООПАСНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

В. В. Валуев¹, Ю. В. Гуляев¹, И. П. Жиган², В. А. Черепенин¹

¹ ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, ²ОАО «КБ «Кунцево»

Получена 22 января 2013 г.

Аннотация. Рассмотрены физические основы бездетонационного обезвреживания оболочечных взрывоопасных объектов лазерным излучением. Предложено качественное описание процессов, протекающих во взрывоопасных объектах при воздействии мощного лазерного излучения. Приводятся результаты натурных экспериментов по воздействию мощного лазерного излучения на реальные взрывоопасные объекты.

Ключевые слова: лазер, мощное лазерное излучение, взрывчатое вещество, взрывоопасные объекты в прочной оболочке.

Abstract. Physical basis of clearance of explosive shells without explosion by means of laser is studied. A qualitative description of the processes is discussed. The results of natural experiments of clearance real explosive objects are given.

Keywords: laser, high-power laser radiation, the explosives, explosive objects in solid shells.

Интенсивное развитие мощных волоконных лазеров открыло перспективы применения лазерных технологий для дистанционного обезвреживания взрывоопасных объектов. Световой луч современных лазеров способен на расстоянии осуществить вскрытие корпусов этих объектов с последующим выжиганием (дефлаграцией) взрывчатого вещества или разрушать объект за счет мощного термического удара без его детонации. Данные обстоятельства определяют существенный интерес ведущих мировых держав к проблеме лазерного обезвреживания взрывоопасных предметов [1].

Использование лазерного излучения для обезвреживания взрывоопасных объектов (ВО), содержащих взрывчатые вещества (ВВ) без их детонации основано на следующем факте.

Детонация (взрыв) представляет собой только одну из возможных форм превращения взрывчатых веществ. Другой его формой является горение. Для горения также характерно большое количество выделяемого тепла, газообразных продуктов и значительная скорость процесса. И, тем не менее, горение принципиально отлично от взрыва. Выжигание ВВ (дефлаграция) не приводит к столь печальным последствиям как детонация.

Основное отличие дефлаграции заключается в механизме распространения химических процессов превращения. Распространение взрыва обусловлено прохождением по заряду ВВ ударной волны, возбуждающей в каждом последующем слое интенсивную химическую реакцию, сопровождающуюся выделением тепла. Распространение же процесса горения по ВВ обусловлено передачей тепла от одного слоя к другому за счет теплопроводности, диффузии и излучения газообразных продуктов горения. Принципиальное отличие в механизме распространения взрыва и горения предопределяет различные скорости этих процессов: скорость горения меньше скорости распространения звука в данном веществе, скорость взрыва превосходит скорость звука в заряде ВВ.

Процесс горения ВВ и его перехода во взрыв ввиду его чрезвычайной сложности изучен еще далеко не полностью, однако общие принципы перехода горения в детонацию различных ВВ известны [2].

На основе существующих представлений переход горения ВВ в детонацию можно представить общей упрощенной схемой (Рис. 1).

Схема включает следующие стадии: I — устойчивое послойное горение; II — конвективное горение; III — низкоскоростной (800—3500 м/сек) режим взрывчатого превращения или детонационное горение; IV — стационарная, нормальная детонация. Применяют следующие названия: детонация с малой скоростью, волновое горение, низкоскоростной режим, детонационное горение.

Каждая из стадий различается механизмом передачи тепла и возбуждения реакции.

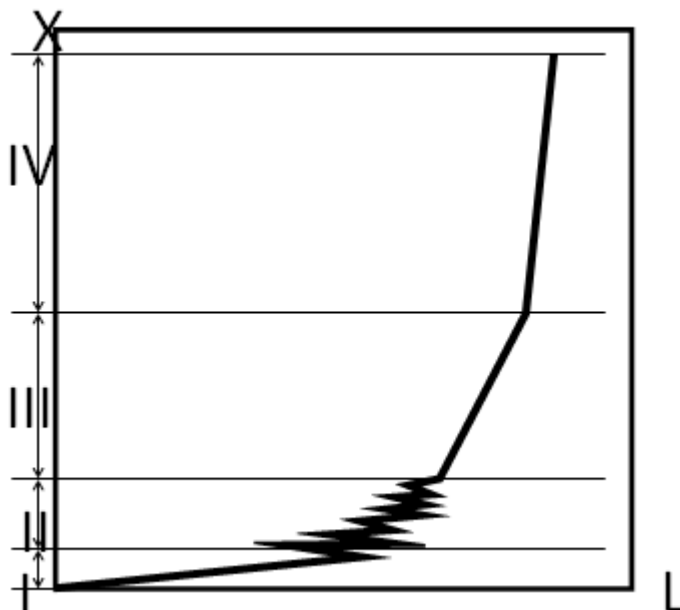


Рис. 1. Общая схема перехода горения ВВ в детонацию

Основной формой передачи тепла при послойном горении является молекулярная теплопроводность, при конвективном горении — вынужденная конвекция. Низкоскоростной режим возбуждается волнами сжатия, детонация — ударной волной. Существование и пространственная протяженность отдельных стадий зависят от структуры заряда, физико-химических свойств ВВ, условий проведения опыта. Конвективное горение может непосредственно переходить в детонацию, минуя стадию III. Развитие процесса может заканчиваться установлением низкоскоростного режима с постоянной скоростью, и возникновение детонации отсутствует.

Основной особенностью большинства ВО является наличие замкнутой оболочки, внутри которой находится ВВ и система его инициирования. В большинстве случаев в качестве материала оболочки используется металл.

При воздействии лазерного излучения на материал оболочки в нем протекает целый ряд физико-химических процессов. В конечном итоге материал оболочки полностью или локально разрушается и лазерное излучение начинает непосредственно воздействовать на материал ВВ. Когда материал

оболочки является достаточно тонким и не стойким к действию лазерного излучения, разрушение оболочки происходит почти мгновенно. В этом случае процесс воздействия излучения на ВО является полностью аналогичным процессу воздействия лазерного излучения на открыто расположенные безоболочечные ВВ [3].

Иначе обстоит дело, когда оболочка ВО является достаточно прочной. Тогда нагреваясь под действием лазерного луча она сама становится локальным источником нагрева для заключенного в ней ВВ вследствие чего в нем запускается механизм термохимических превращений. При этом термохимические превращения ВВ протекают в замкнутом объеме без возможности оттока продуктов реакции из зоны ее протекания. Данное обстоятельство приводит к росту давления как непосредственно в зоне реакции, так и во всей оболочке в целом. Вполне очевидно, что рост давления приводит к резкому ускорению протекающих термохимических процессов, и, как следствие, к еще большему увеличению давления.

Такой самоускоряющийся процесс в конечном итоге может привести к детонации ВВ, что не желательно.

Рассмотрим более подробно последовательность термохимических превращений, происходящих в ВВ, помещенном в прочную не разрушаемую оболочку.

Лазерное излучение, поглощаясь оболочкой ВВ, создает в ней локальный тепловой источник. Прилегающие к месту локального нагрева области материала ВВ начинают нагреваться, передавая получаемое тепло в глубь материала. По мере роста температуры в слоях ВВ, непосредственно прилегающих к источнику нагрева начинают происходить термохимические реакции разложения, в том числе и экзотермические, усиливающие прогрев области реакции. Термическое расширение ВВ и газообразование вследствие термического распада материала ВВ увеличивают давление в зоне прогрева.

Когда температура за счет энергии подводимой лазерным излучением и выделяемой вследствие экзотермического распада ВВ достигает то значения

температуры плавления а в дальнейшем и температуры кипения материал ВВ начинает плавиться и испаряться.

При достижении температурой значения вспышки ВВ последнее загорается. Вполне очевидно, что так как в составе ВВ имеется внутренний окислитель, горение протекает в замкнутом объеме без доступа атмосферного кислорода.

Происходящее в процессе горения интенсивное газообразование и повышение вследствие этого давления в зоне горения способствует переходу нормального послойного горения ВВ в конвективное вихревое горение. Этому способствуют образовавшиеся в процессе горения раскаленные газы проникающие в поры ВВ и поджигающие их а так же растрескивание материала ВВ вследствие его термодформаций.

Горячие газы, проникая под давлением в пространство между оболочкой и материалом ВВ зажигают все большую его поверхность. Этому способствует термическое расширение самой оболочки. Таким образом локальное конвективное горение переходит в конвективное горение по поверхности материала ВВ, охватывая все большую ее часть.

Совсем по другому протекают процессы детонационного горения. Здесь химические реакции разложение ВВ обусловлены прохождением по заряду волны давления (сжатия), возбуждающей в каждом последующем слое интенсивную химическую реакцию, сопровождающуюся выделением тепла и, как следствие повышением интенсивности волны давления.

Таким образом, повышение давления в области горения, обусловленное невозможностью оттока газообразных продуктов сгорания до соответствующего уровня приводит к тому, что конвективное и поверхностное горение ВВ переходит в режим детонационного горения. В этом случае возникшая волна давления раскаленных газов распространяется по объему ВВ с достаточно большой, но дозвуковой скоростью, вовлекая в реакцию распада все новые слои материала.

Распространяясь по толще заряда волна давления усиливается за счет энергии реакции распада ВВ и может достигнуть критического уровня ударной волны, когда детонационное горение переходит в нормальную детонацию, то есть во взрыв.

По сути природы химической реакции детонационное горение и нормальная детонация аналогичны. Разница состоит лишь в том, что при детонационном горении выделяется не более 30% химической энергии потенциально находящейся во взрывчатом веществе, а скорость ее протекания хоть и существенно превышает скорость реакции нормального и конвективного горения все же в десятки раз ниже скорости нормальной детонации. В этом случае, работа осуществляемая ВВ при его разложении путем детонационного горения составляет лишь единицы (порядка 1 – 3) процентов величины работы, осуществляемой ВВ при его детонации (взрыве).

Таким образом обезвреживание ВО путем реализации процесса детонационного горения ВВ, наряду с процессами нормального и конвективного горения (дефлаграции) является допустимым и вполне безопасным.

Как уже было отмечено, прерывание цепочки последовательных термохимических процессов разложения ВВ может быть осуществлено путем резкого снижения давления в зоне химической реакции. Последнее возможно реализовать путем разгерметизации (разрушения) оболочки ВО до момента когда давление в ней превысит порог детонации.

В процессе воздействия лазерного излучения на оболочечные ВО физико-термические процессы протекают не только в материале ВВ, но и в самой оболочке. Под действием энергии лазерного луча оболочка может термически разлагаться, рекристаллизовываться, подвергаться аморфизации и размягчению и, наконец, расплавляться и испаряться. Все перечисленные процессы, так или иначе, приводят к потере оболочкой своих прочностных свойств при этом значение внутреннего критического давления разрушения оболочки с течением времени существенно уменьшается.

Здесь мы, по сути, имеем дело с двумя встречными процессами. С одной стороны в ходе воздействия лазерного излучения на оболочку снижается значение критического давления ее разрушения, а с другой – повышается внутреннее давление в оболочке.

Таким образом, внутреннее давление, выдавливая разрушающийся или расплавляющийся материал оболочки или просто разрывая ее разгерметизирует оболочку тем самым препятствуя возникновению детонации ВВ. Именно данная совокупность процессов и позволяет эффективно использовать лазерное излучение для бездетонационного обезвреживания ВО.

С целью демонстрации возможности бездетонационного обезвреживания оболочечных ВО нами была проведена серия экспериментов. В экспериментах в качестве ВО объекта использовались стальные цилиндры из стали Ст.3 с толщиной стенок 2 мм. В качестве наполнителя (ВВ) использовались тротил а так же смесь тротила и гексогена 40% и 60% соответственно. Общий вес ВВ составлял 430 г.

В экспериментах использована лазерная установка, выполненная по патенту [4] на базе иттербиевого волоконного лазера. В процессе проведенных исследований было установлено несколько возможных механизмов обезвреживания ВО:

1. Вскрытие стенки контейнера путем проплавления в нем сквозного отверстия с последующим выжиганием ВВ через это отверстие. Типовые условия реализации данного режима следующие: Мощность лазера была установлена на уровне 1,5 кВт, гауссов диаметр лазерного луча на объекте – 5 мм. Среднее время вскрытия контейнера (проплавления стенки и выдавливания расплава внутренним давлением) составило 5,4 с. После вскрытия контейнера наблюдается интенсивное выгорание ВВ под действием лазерного излучения. При горении ВВ его детонация не наступала. В ходе экспериментов установлено, что после снятия излучения тротил самопроизвольно горит в

течение времени порядка 30 с, после чего самопроизвольное горение затухает и прекращается. На рис. 2 приведены результаты воздействия на ВО.

2. Разрушение контейнера тепловым взрывом в районе прогретой лазером области за счет внутреннего давления, создаваемого горящим ВВ с последующим распылением материала заряда не допускающим его детонацию. Мощность лазера была установлена на уровне 2,5 кВт, гауссов диаметр лазерного луча на объекте – 20 мм.

Проплавления стенки контейнера излучением не достигнуто, основываясь на наблюдаемых на контейнере в области воздействия излучения цветах побежалости и исходя из гауссова профиля лазерного пучка максимальная температура прогрева материала оболочки контейнера оценивается в 1000C° - 900C° что в полтора раза ниже температуры плавления стали. Через 0,96 с после начала облучения произошел тепловой взрыв контейнера. На рис. 3.приведено фото ВО после теплового взрыва.

Следует отметить, что разрушение ВО началось не в области лазерного прогрева, а в донной части контейнера. После 1,0 с. облучения разрушение приобрело взрывной характер, причем до момента взрыва и в его процессе происходило интенсивное горение ВВ. После разрыва контейнера к 1,04 горение ВВ прекратилось и на снимке ясно видно в облаке газообразных продуктов горения четко сформировавшееся облако разлетающихся твердых остатков ВВ. Эти остатки отчетливо видны на рис. 3 в виде порошка желтого цвета. К 1,20 с облако твердых остатков в основном рассеялось и в кадре стал заметен лазерный луч, рассеивающийся на взвеси мелкодисперсных остатков продуктов сгорания.

Следует отметить, что, не смотря на кажущуюся мощь теплового взрыва его интенсивность совершенно незначительна. В процессе взрыва установленная в бронекамере на расстоянии 3 м от его эпицентра открыто расположенная видеорегистрирующая аппаратура не была повреждена и продолжала работать.

Исходя из анализа кинограмм, прогаров и внешнего вида контейнера после теплового взрыва, общих теоретических представлений о развитии процессов горения ВВ в прочных замкнутых оболочках картина протекания процесса взрыва в рассматриваемом эксперименте выглядит следующим образом.



Рис. 2. Результаты дефлаграции тротила



Рис. 3. Результат действия теплового взрыва

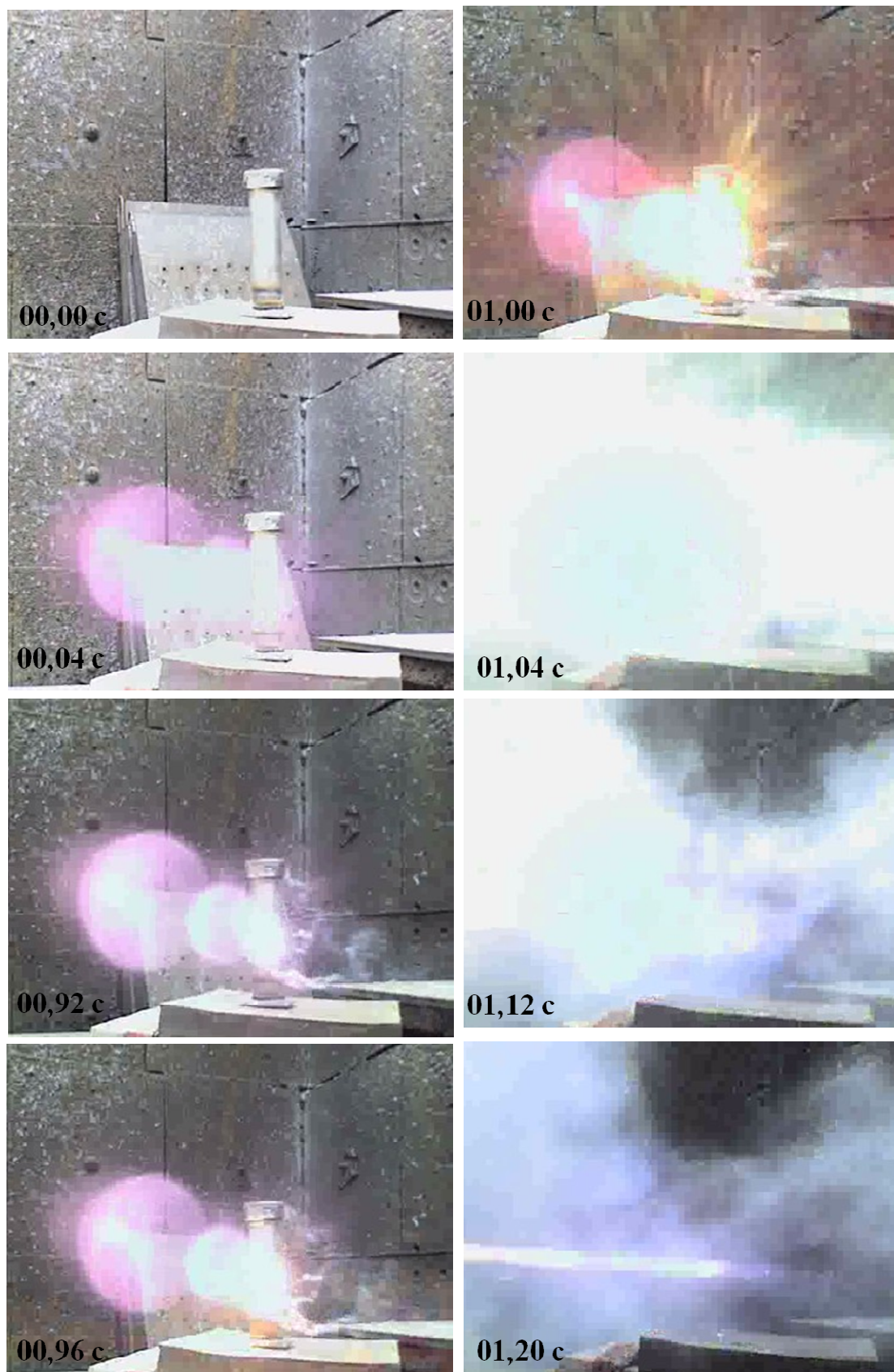


Рис. 4. Кинограмма теплового взрыва

Повышенная мощность лазерного излучения привела к росту температуры в области воздействия луча выше значения температуры вспышки ВВ (для тротила: $290 - 230\text{ C}^\circ$, гексогена: $215 - 230\text{ C}^\circ$), причем, учитывая значительный размер области начального прогрева превышающий критический диаметр зажигания ВВ, вспышка произошла практически мгновенно. При этом из-за большого диаметра лазерного пятна существенных изменений в прочностных свойствах оболочки в районе воспламенения не произошло. Большая площадь горения, чем в описанном выше эксперименте 1. (в 16 раз) обеспечила большую степень газообразования и повышения давления. Резкое нарастание давления способствовало переходу нормального горения в конвективное поверхностное горение, причем, по-видимому, из-за дефектов заливки материала ВВ в корпус, основная волна горения и давления распространилась к донному концу контейнера. Отразившись от донного конца поток раскаленных газов, встретился с набегающим потоком. В месте столкновения образовалась зона повышенного давления, что привело к переходу горения в фазу детонационного горения. Это обстоятельство привело к скачку температуры в данной зоне и, как следствие, давления. Это ясно видно из рисунка цветов побежалости на корпусе контейнера. Дальнейшее повышение давления привело к разрыву корпуса в донной его части. После разрыва корпуса и резкого сброса давления процесс горения прекратился.

3. Рассмотренные выше примеры обезвреживания ВО лазерным излучением 1. и 2. являют собой два крайних случая. Возможны и промежуточные варианты реализации процесса нейтрализации ВО при которых не происходит проплавление его корпуса и не достигается режим теплового взрыва. В данных вариантах за счет повышения давления происходит безвзрывной разрыв корпуса ВО после которого ВВ может быть нейтрализовано путем открытого выжигания. Результат такого воздействия приведен на рис. 5. Как видно из рисунка, разрыв корпуса происходит в месте воздействия лазерного луча из-за потери материалом контейнера своих прочностных свойств вследствие лазерного прогрева. Подобные результаты

получаются при диаметрах лазерного пучка порядка 10 мм - промежуточных приведенным в описании экспериментов 1. и 2.

В заключение следует отметить, что основная проблема бездетонационного обезвреживания ВО состоит в обеспечении разгерметизации его оболочки до момента, когда давление в ней превысит предел детонации ВВ. Основной характеристикой лазера в этом случае является диаметр пучка излучения на объекте. При больших диаметрах пятна с одной стороны увеличивается время разрушения оболочки, с другой – увеличивается скорость нарастания давления в ней. При малых диаметрах пятна размера образовавшегося отверстия не достаточно для интенсивного отвода продуктов разложения ВВ и эффективного сброса давления. Наиболее рациональными в этом плане являются пучки излучения с гауссовым диаметром от 3мм до 5мм.

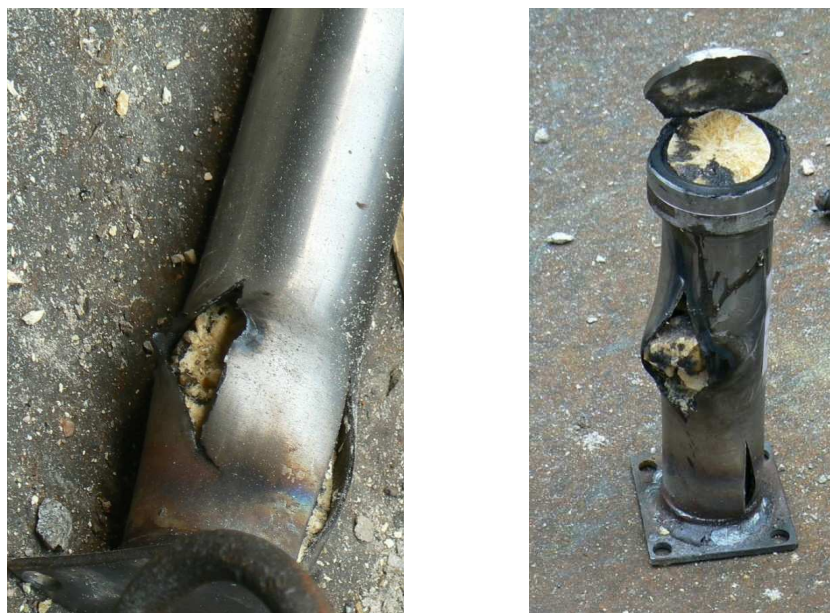


Рис. 5. Результаты воздействия лазерного излучения

Конечно, проблема взаимодействия лазерного излучения с ВО, тем более оболочечными является предельно сложной и не поддается полному теоретическому анализу. В настоящее время практически отсутствуют экспериментальные результаты исследований в этой области. В этой связи для успешного решения задачи практической реализации систем и комплексов лазерного дистанционного обезвреживания взрывных и взрывоопасных

объектов необходим целый цикл натурных исследований, проводимых с различными типами и конструкциями объектов.

Литература

1. И.П. Жиган, Лазер против мин и снарядов, «Оборонный заказ», №2(15), 2010, стр. 28-31
2. Переход горения конденсированных систем во взрыв. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В. М., «Наука», 1973 г, стр. 292.
3. Андреев К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1960 г, стр. 346.
4. Жиган И.П., Валуев В.В. Патент на полезную модель № 108887 Лазерный комплекс «Искра», 2011 г.