

## Эффекты неидеальности инициирования и распространения детонации в снаряжении боеприпасов как фактор снижения стабильности характеристик их поражающего действия

**77-30569/291153**

# 11, ноябрь 2011

Козырев А. В., Соловьев В. С.

УДК 623.4.08

МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[sm4@sm.bmstu.ru](mailto:sm4@sm.bmstu.ru)

### Введение

Система передачи детонационного импульса или огневая цепь (ОЦ) являются основным функциональным элементом любого типа средства поражения (СП) и боеприпаса (БП), содержащего в качестве основного энергетического источника обеспечения заданного могущества действия разрывной заряд взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 1).



Рис. 1. Обобщенная структурно-функциональная схема ОЦ СП и БП

Функционально ОЦ призвана помимо эксплуатационной и функциональной безопасности СП и БП обеспечивать в заданных условиях в требуемый момент времени в определенном диапазоне внешних воздействий инициирование в разрывном заряде устойчивого детонационного режима превращения исходного ВВ в продукты взрыва. При этом необходимо обеспечить максимально быструю ответную реакцию элементов ОЦ в режиме наиболее приближенном к детонационному. Под выходной функцией разрывного заряда ВВ будем понимать пространственно-временное распределение энергии или импульса, передаваемых продуктами детонации окружающей среде или поражающему элементу конструкции СП и БП.

Вне зависимости от типа СП и БП фактор надежности и стабильности функционирования ОЦ в штатном режиме, на практике, характеризуется только пороговым уровнем значений, определяющим вероятность боевого срабатывания изделия в целом. Однако на фоне практически нормированных показателей надежности и стабильности ОЦ СП и БП необходимо также регламентировать последствия неидеальности функционирования ОЦ, не приводящие к отказу боевого срабатывания изделия в целом, но при этом существенно влияющие на выходную функцию разрывного заряда ВВ, а, следовательно, на характеристики поражающего действия СП и БП.

В рамках сильной зависимости (чувствительности) характеристик поражающей способности к варьированию показателей выходной функции разрывного (основного) заряда ВВ в первую очередь следует отметить СП и БП прецизионного направленного

использования энергии ВВ (рис. 2): кумулятивные заряды в составе боевых частей одноименного типа СП и БП; снарядоформирующие заряды в составе боевых частей противотанковых самоприцеливающихся боевых элементов, противотанковых управляемых ракет, инженерных мин и т.п.; специальные СП и БП.

К устройствам и функциональным узлам прецизионного направленного использования энергии взрыва относятся: взрывомагнитные генераторы, в т.ч. в составе специальных боеприпасов; взрывные плазменные генераторы; детонационно-волновые генераторы (фокусирующие, коллимирующие, юстирующие); детонационные распределители (линейные, поверхностные, объемные, детонационные логические элементы) и т.п.

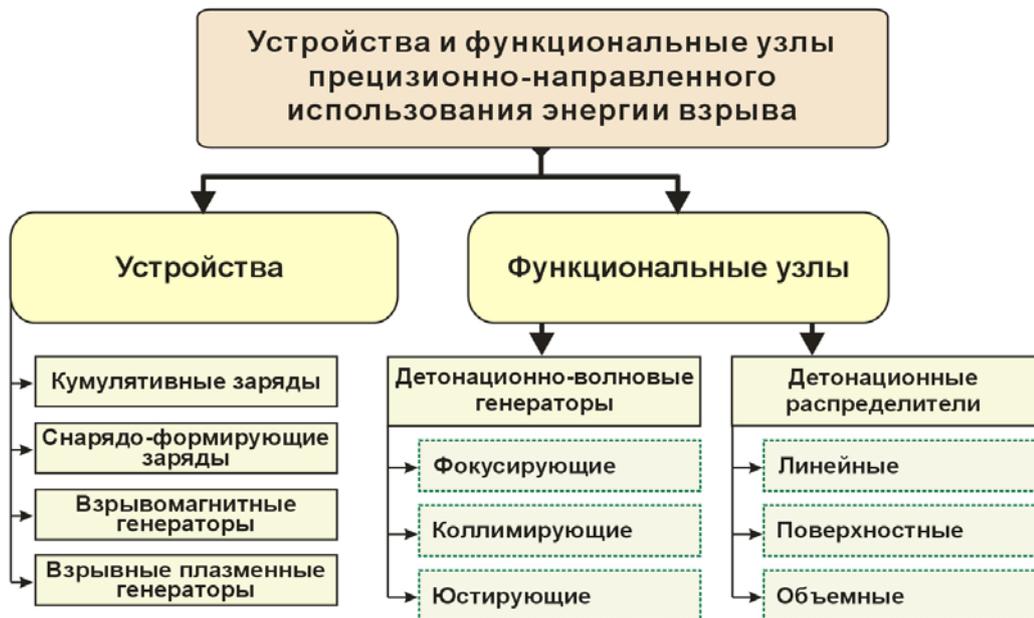


Рис. 2. Устройства и функциональные узлы прецизионно-направленного использования энергии взрыва

В настоящее время в связи с усилением защищенности бронированной техники актуальным является вопрос постоянного совершенствования средств ее поражения [1]. В технических заданиях на проектирование кумулятивных СП и БП, поражающих наиболее защищенные фронтальные поверхности бронетехники, «закладывается» бронепробиваемость в  $(8...12)d$ , где  $d$  - диаметр боевой части изделия. По данным зарубежных и отечественных источников [2, 3] такой уровень бронепробиваемости кумулятивных СП вполне достижим при использовании прецизионной технологии изготовления кумулятивных зарядов и традиционных направлений оптимизации конструктивных параметров кумулятивных СП и БП.

Вместе с тем, при достижении таких высоких уровней бронепробиваемости на первое место выдвигаются вопросы стабильности действия кумулятивных СП и БП, которые в условиях прецизионной технологии изготовления кумулятивной облицовки и заряда ВВ определяются, главным образом, конструкцией и надежностью действия узлов инициирования и управления детонационным фронтом.

В современных конструкциях кумулятивных СП узел инициирования представляет собой, по-существу, детонационно-волновой распределитель, призванный обеспечить передачу симметричного детонационного импульса на заряд ВВ и далее на кумулятивную облицовку. Дефекты в узле инициирования, возникающие в результате различных физических и технологических факторов, приводят к искажениям симметрии и формы фронта ДВ. В дальнейшем это может, в свою очередь, приводить к развитию

неустойчивости при обжати кумулятивной облицовки, возникновению волновых процессов в зоне струеобразования, появлению боковой составляющей скорости движения кумулятивной струи, боковому сносу кумулятивной струи в процессе ее движения, обуславливающему расширение, а не углубление каверны в бронепреграде.

В данной связи, обращают на себя внимание результаты исследований [5, 6], выявивших группу факторов, обусловленных конструктивными особенностями кумулятивных зарядов в составе боевых частей СП и БП, выполненных на пределе технологической точности, которые определили появление значительного разброса величины бронепробития изделий в испытательной выборке.

Так, в процессе экспериментальной отработки конструкции основного 152-мм кумулятивного заряда модернизированной тандемной кумулятивной боевой части противотанковой управляемой ракеты, было зафиксировано, что разброс величины бронепробития гомогенной стальной преграды колеблется в диапазоне  $\pm 22\%$  от  $L_{ср}$ . Объяснить такую нестабильность действия боевых частей не удавалось даже путем учета совместного действия всех контролируемых технологических дефектов и отклонений, имеющих место при изготовлении кумулятивных зарядов.

Параллельно развиваемым концептуальным направлением постоянного совершенствования средств поражения бронированной техники является создание интеллектуальных СП и БП, действующих по их наименее защищенным проекциям [3, 7]. Основу данного вида средств поражения на сегодняшний день составляют изделия с боевыми частями типа снарядоформирующий заряд, образующие при взрыве высокоскоростной компактный или удлиненный поражающий элемент.

На этапах функционирования снарядоформирующего заряда влияние фактора стабильности выходной функции разрывного заряда ВВ сводится к несимметричному формированию элементов хвостового оперения поражающего элемента и появлению кинематических возмущений его движения. В свою очередь наличие несимметричного отклонения параметров формы от заданных в совокупности с кинематическими возмущениями движения поражающего элемента (радиальной составляющей скорости движения центра масс и угловой скоростью вращения в экваториальной плоскости) негативным образом сказываются на его внешней баллистике, в результате отражаясь на характеристиках точности попадания и уровне бронепробития [8, 9].

Так, по данным [10], значение промаха высокоскоростного удлиненного поражающего элемента снарядоформирующего заряда на дистанции  $L=20$  м до цели составляет  $R \sim 0.01$  м, на дистанции  $L=100$  м -  $R \sim 0.3$  м. При этом бронебойное действие высокоскоростных поражающих элементов характеризуется вероятностным унимодальным распределением величины предельно пробиваемой толщины гомогенной брони в силу наличия у элемента на полете поперечной угловой скорости колебания относительно центра масс [8].

## **1. Источники неидеальности иницирования и детонации зарядов ВВ в составе ОЦ СП и БП**

В общем случае к источникам зарождения и развития неидеальности иницирования и распространения детонации в зарядах (навесках) ВВ в составе ОЦ СП и БП следует отнести, пять основных категорий несовершенств (рис. 3):

- 1) системно-методологические недочеты разработки и проектирования ОЦ СП и БП и их элементов;
- 2) технологические несовершенства изготовления и сборки деталей ОЦ;
- 3) технологические несовершенства изготовления и снаряжения зарядов (навесок) ВВ;
- 4) последствия эксплуатационных и функциональных воздействий на ОЦ в составе СП и БП до санкционированного подрыва (хранение,

транспортировка, зарядание, процессы внутренней, промежуточной, внешней и конечной баллистики СП и БП);

- 5) функциональные несовершенства работы унифицированных штатных элементов конструкции СП и БП: источников инициирования и трансляции детонационного импульса.



Рис. 3. Категории факторов, снижающих эксплуатационную безопасность, функциональную надежность и стабильность ОЦ СП и БП

### 1.1. Системно-методологические недочеты разработки и проектирования ОЦ СП и БП

Основными причинами появления данной категории ошибок является отсутствие достаточных качественных и количественных представлений о физических явлениях и процессах, конструктивно закладываемых в ОЦ проектируемого СП и БП. Это обусловлено трудностью построения адекватных имитационных моделей ввиду сложности природы эксплуатируемых явлений и эффектов, а также многомерности и многосвязности сильно неравновесных переходных процессов функционирования ОЦ.

Сверх того, нелинейный характер явлений и эффектов, определяющих функционирование элементов ОЦ, принципиально допускает существование неопределенности исхода процесса в ряде его характеристик, т.е. возможную неустойчивость значений компонентов выходной функции элемента или изделия в целом.

Следствием отсутствия законченной теоретической основы является неполнота критериально-методологической базы проектирования, что в итоге приводит к необходимости экспериментальной отработки изделий, которая в свою очередь ограничена рядом принципиальных особенностей [2]:

- 1) одноразовость сборки изделия/элемента и отсутствие возможности предварительной или повторной проверки;
- 2) срабатывание элементов цепи приводит, как правило, к разрушению всей сборки;
- 3) экспериментально обрабатываемая выборка существенно ограничена по количеству опытных образцов и зачастую исчисляется несколькими единицами, что не позволяет сделать выводы о стабильности характеристик функционирования изделия или его элементов.

По указанным причинам оценка качества работы элементов ОЦ чаще всего проводится по характеристикам эффективности действия изделия в целом.

Таким образом, объективными следствиями вышеизложенного являются конструктивные решения, выполненные с принципиальными неточностями, по функциональным критериям максимизации могущества действия, технологичности и рентабельности производства, но без учета требований систематической надежности и стабильности функционирования изделия.

### *1.2. Технологические погрешности изготовления и сборки ОЦ СП и БП*

Одной из ключевых проблем, решаемых при создании новых образцов СП и БП, является эффективное назначение и последующее обеспечение точности их конструктивных параметров.

В общем случае, в качестве характеристик точности конструктивных параметров выступают технологические погрешности изготовления и сборки изделий [11].

Опыт конструктивно-технологической отработки различных типов СП и БП показывает, что с ростом точности изготовления СП и БП показатели эффективности действия изделий (кучность попадания, могущество действия у цели и т.п.) существенно повышаются. Однако при этом необходимо учитывать, что всецелое повышение точности изготовления конструктивных составляющих СП и БП приводит к неоправданному удорожанию изделия в целом на порядки, что в условиях массового или крупносерийного изготовления выдвигает критерии рентабельности производства конкретного изделия на уровень принятия решения о его практической целесообразности в качестве штатного.

Комплекс процедур конструктивно-технологической отработки в рамках обеспечения конструктивно заложенных тактико-технических характеристик СП и БП прецизионно-направленного использования энергии ВВ выдвигает на первый план необходимость назначения и обеспечения требований по точности, предъявляемых к деталям, сборочным единицам и изделию в целом. В своем составе данный комплекс процедур непосредственно включает отработку ОЦ как основного функционального элемента любого типа СП и БП, за исключением частных случаев эффективной унификации штатных элементов ОЦ.

На сегодняшний день, одним из прогрессивных путей решения проблемы назначения рациональных требований по точности на продукцию специального машиностроения является подход на основе анализа количественных взаимосвязей технологической наследственности, тактико-технических и эксплуатационных характеристик изделия [12].

### *1.3. Технологические несовершенства изготовления зарядов ВВ*

Как известно, структура компонентов и технология изготовления (снаряжения) определяют структуру заряда (навески) ВВ, а, следовательно, его чувствительность. Последняя в большей степени проявляется через пористость, которая является тем

потенциальным свободным объемом, в котором возможна локальная генерация тепла при ударно-волновом нагружении. Пористость, в конечном счете, характеризует функциональные качества заряда и его чувствительность.

Так, для *литых* смесевых зарядов типа тротил-гексоген (ТГ) или тротил-октоген важно не только процентное соотношение компонентов, но и распределение зерен гексогена или октогена в расплаве тротила, определяющее энергетику заряда. Характерные морфологические несовершенства литых зарядов в основной массе относятся к следующим типам: неравномерность пространственного распределения твердого компонента литьевой смеси по объему матричного; пространственная анизотропия размеров, формы и ориентации зерен матричного состава; пространственная анизотропия распределения пор по размерам, форме и ориентации.

В литых разрывных зарядах в результате несоблюдения технологического режима наполнения корпусов СП и БП могут возникнуть следующие дефекты (рис. 4): раковина, свищ, сосредоточенная осевая сыпь, крупнокристаллические включения, пузырчатость, трещины и складки.

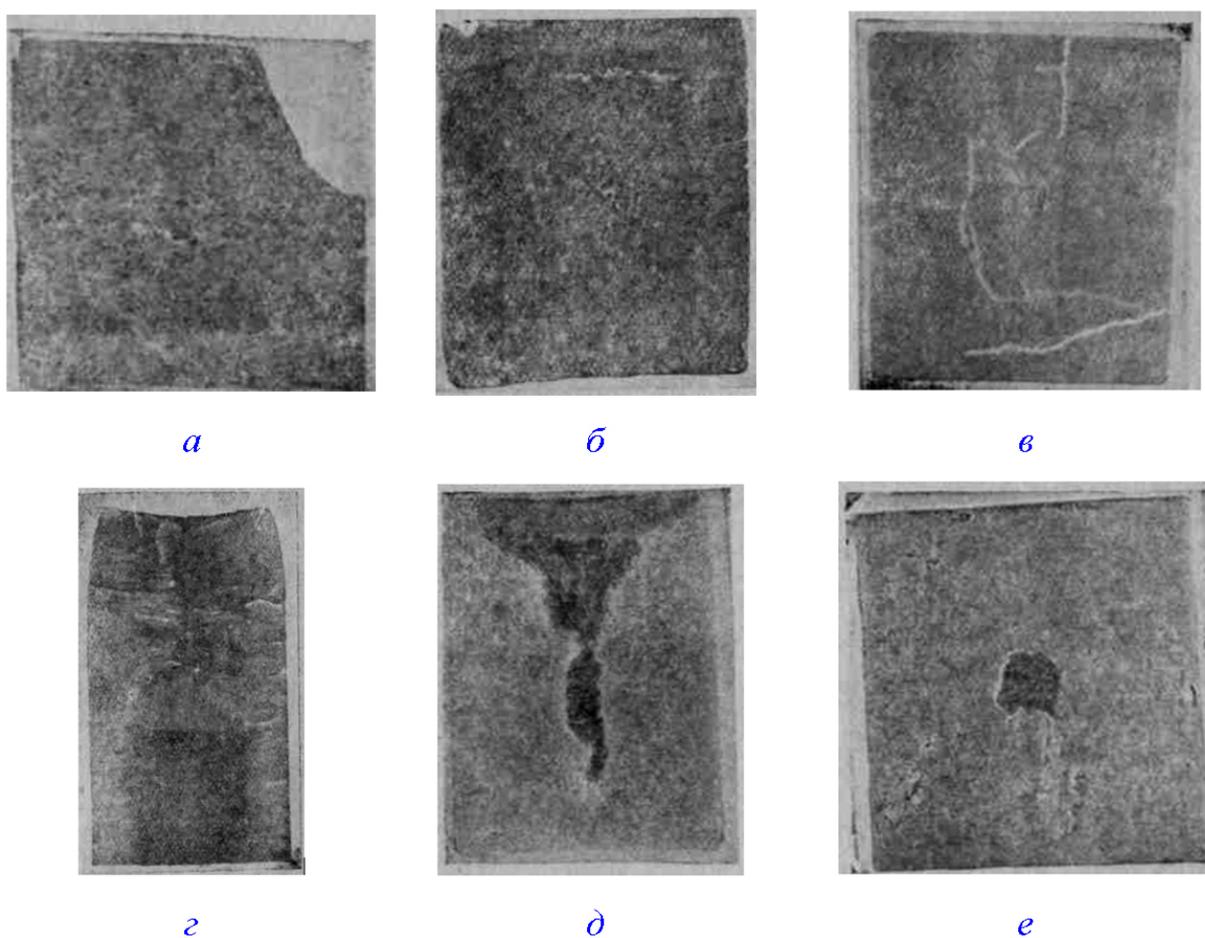


Рис. 4. Дефекты структуры литых разрывных зарядов: *а* – сыпь, сосредоточенная по оси разрывного заряда; *б* – пузырчатость в разрывном заряде; *в* – поперечные и продольные трещины в разрывном заряде; *г* – крупнокристаллическое строение разрывного заряда; *д* – раковина в разрывном заряде; *е* – свищ в разрывном заряде

На этапах работы отделов технического контроля производства, как правило, контролируются только крупномасштабные дефекты, которые в большей степени ответственны за эксплуатационную безопасность, чем за надежность и устойчивость функциональных характеристик изделия в партии.

Несколько по-иному те же факторы соотносятся с *прессованными* зарядами. Основная масса взрывчатых составов прессуется с флегматизатором, равномерность покрытия которым зерен мощного ВВ является определяющим его плотность (пористость) фактором, а, следовательно, и его чувствительность.

Так, в процессе механического уплотнения под действием давления (прессования) наблюдаются трехстадийная последовательность образования связей между частицами [13]. При этом появление пространственной анизотропии микроструктуры заряда на всех стадиях уплотнения ВВ является неизбежным следствием влияния технологических факторов процесса прессования, основным из которых является сложное неравновесное напряженно-деформированного состояния материала в матрице. Итогом несовершенства существующих технологий прессования является пространственная разноплотность, неравномерность распределения остаточных напряжений, анизотропия прочностных свойств прессовок, неравномерность распределения пор и зерен индивидуального ВВ по размеру, их покрытие флегматизатором и т.д. [13].

#### *1.4. Эксплуатационные и функциональные воздействия на СП и БП до санкционированного подрыва*

Влияние предварительного воздействия на этапах хранения, транспортировки, заряжания, внутренней, промежуточной, внешней и конечной баллистики в еще большей степени затрудняет достоверный прогноз надежности и стабильности работы ОЦ СП и БП. К моменту работы ОЦ заряд ВВ и ее элементы могут испытывать интенсивные динамические и термические воздействия:

- 1) перегрузки в канале ствола;
- 2) перегрузки при метании кассетных элементов;
- 3) перегрузки при проникании в прочные протяженные преграды;
- 4) аэродинамический разогрев при транспортировке на наружной подвеске авианосителя и т.д.

Результирующие изменения физико-механических, термодинамических, структурно-морфологических и др. свойств заряда ВВ неоднозначно влияют на характеристики чувствительности и могут как повышать ее, так и снижать. Возможность изменения физико-механических свойств при интенсивных функциональных взаимодействиях во многом определяется технологией изготовления и сборки заряда.

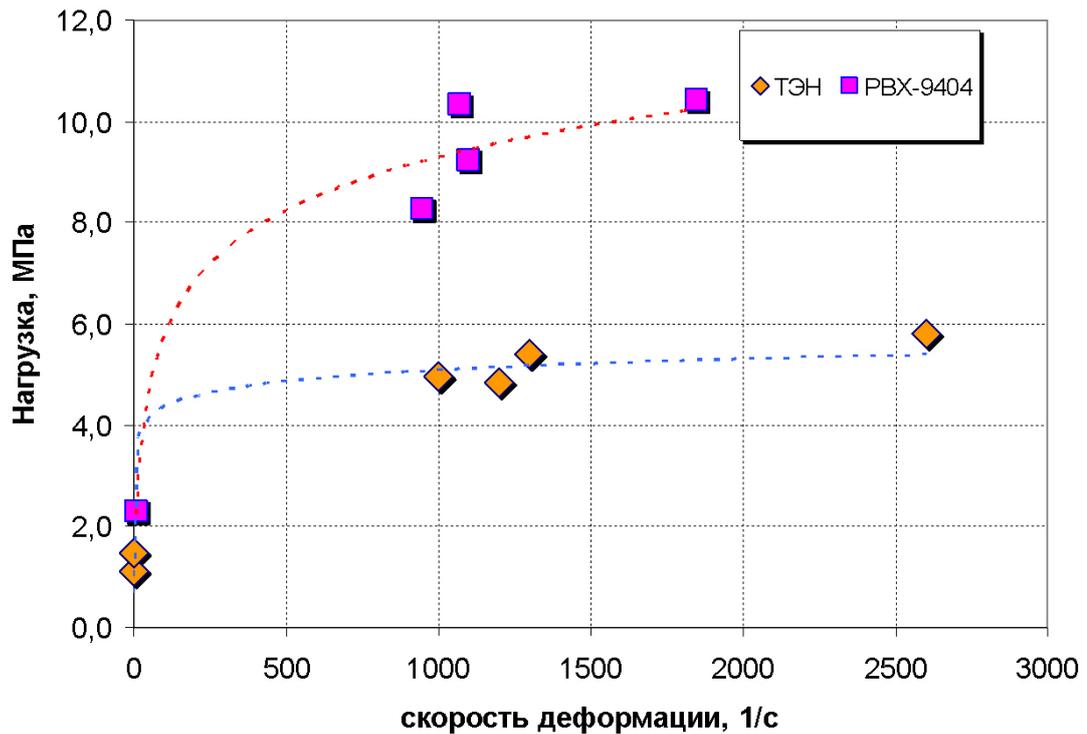


Рис. 5. Зависимость разрушающей нагрузки от скорости деформации для кристаллов ТЭНа и октогена в составе РВХ-9404 [14]

Для составов ТГ 40/60 и ТГ 50/50 в исходном состоянии размер пор и пористость отличаются незначительно. При этом количество пор в единице объема в составе ТГ50/50 примерно в 1,5 раз больше, чем в ТГ40/60, что указывает на то, что пористость в смесях ТГ определяется в первую очередь структурой тротила, которого в составе ТГ50/50 больше.

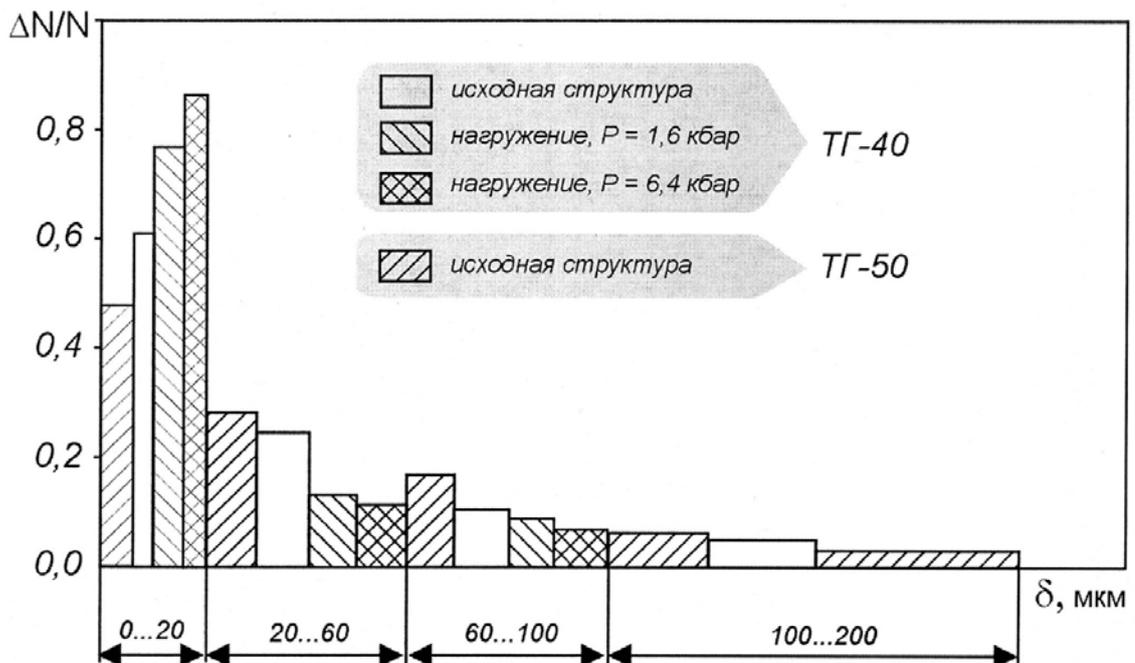


Рис. 6. Распределение плотности частиц гексогена по размерам в литых составах ТГ-40, подвергнутых ударно-волновому нагружению [15]

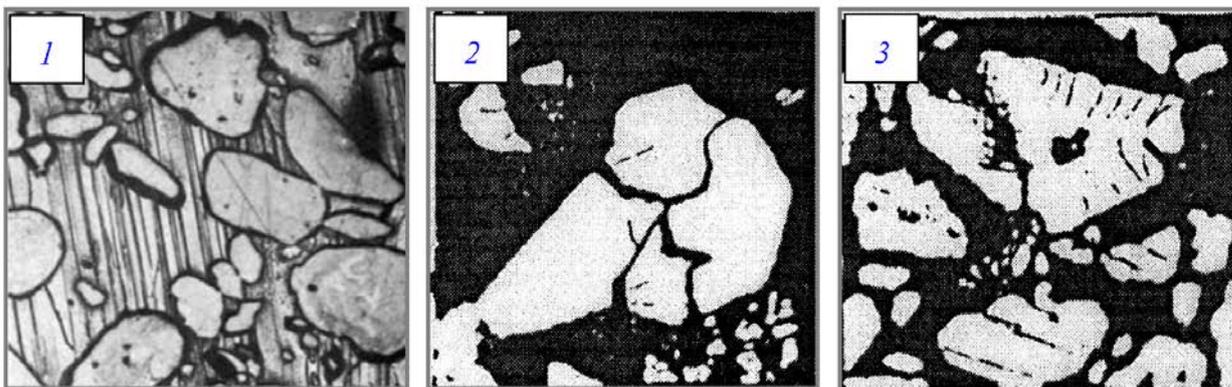


Рис. 7. Изображения микрошлифов образцов ТГ-40/60 после ударно-волнового нагружения: 1 – исходная микроструктура, 2 –  $p=0,6$  ГПа,  $t=140$  мкс; 3 –  $p=0,6$  ГПа,  $t=110$  мкс [15]

При слабом ударно-волновом воздействии на ВВ, когда разложение в результате химической реакции отсутствует, основные статистические характеристики объемной структуры заряда существенно изменяются. На примере составов типа ТГ основные изменения в структуре заряда сводятся к следующему: структура фазы тротила меняется, первоначальная ориентация фазы нарушается. С увеличением давления эффекты трещинообразования и дробления частиц усиливаются, средний размер частиц и его среднеквадратическое отклонение уменьшаются. Количество частиц гексогена в единице объема возрастает в 2,7 раза ( $p=0,64$  ГПа), при этом происходит незначительное увеличение относительного количества ( $0,88...0,96$ ) частиц мелкой фракции (до 20 мкм).

Следует отметить, что данных по изменению структуры ВВ при динамических воздействиях на сегодняшний день недостаточно, что связано с трудностью их установления и многозначностью ответных реакций исходной структуры на динамические воздействия. Однако большинство случаев аномального функционирования изделия, при условии отработанной ОЦ, зависит от фактора существенного изменения физической структуры заряда.

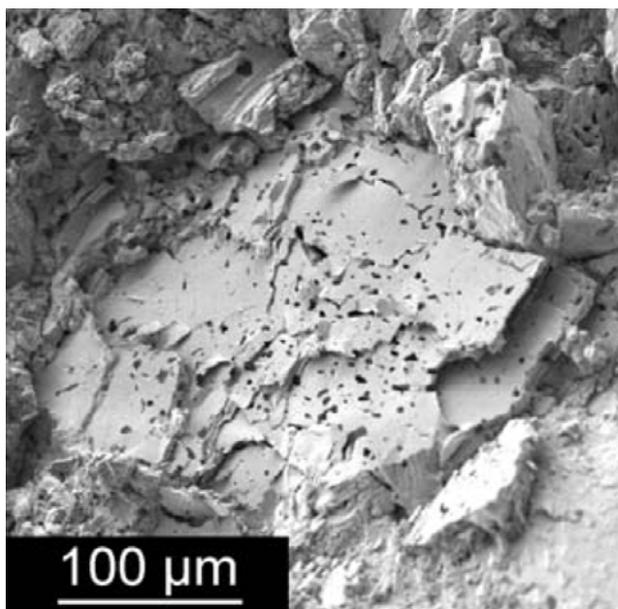


Рис. 8. Микроструктура состава PBX-9501 после термического воздействия на заряд [16]

При интенсивном температурном воздействии, на заряд усиливается процесс термохимического распада ВВ. При этом локализация разложения происходит преимущественно в областях дефектов кристаллов, на границах зерен ВВ и флегматизатора, на поверхностях пор и микротрещин. Следствием расширения газообразных продуктов разложения является морфологическое изменение структуры заряда (рис. 8): раскрытие и слияние трещин, рост пористости (рис. 9) и т.п.

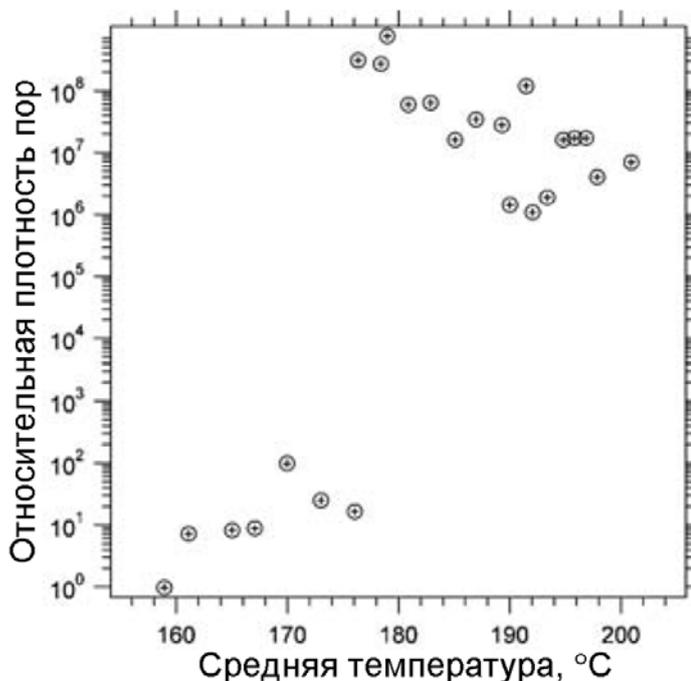


Рис. 9. Изменение среднего значения плотности пор в образце РВХ-9501 в зависимости от средней температуры заряда [17]

#### *1.5. Функциональные несовершенства штатных средств детонирования*

Штатные средства детонирования (средства инициирования и трансляции детонационного импульса) предназначены для генерации достаточно мощного взрывного импульса, необходимого для возбуждения детонации в заряде бризантного взрывчатого вещества (рис. 10).

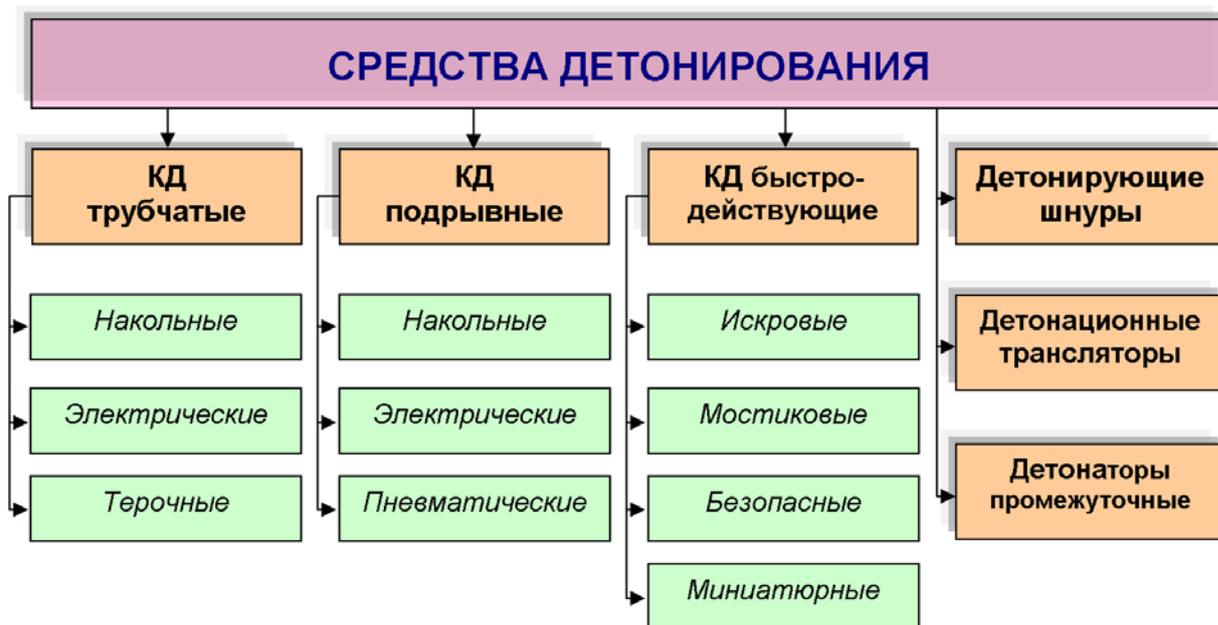


Рис. 10. Классификация средств детонирования (средства инициирования и трансляции детонационного импульса)

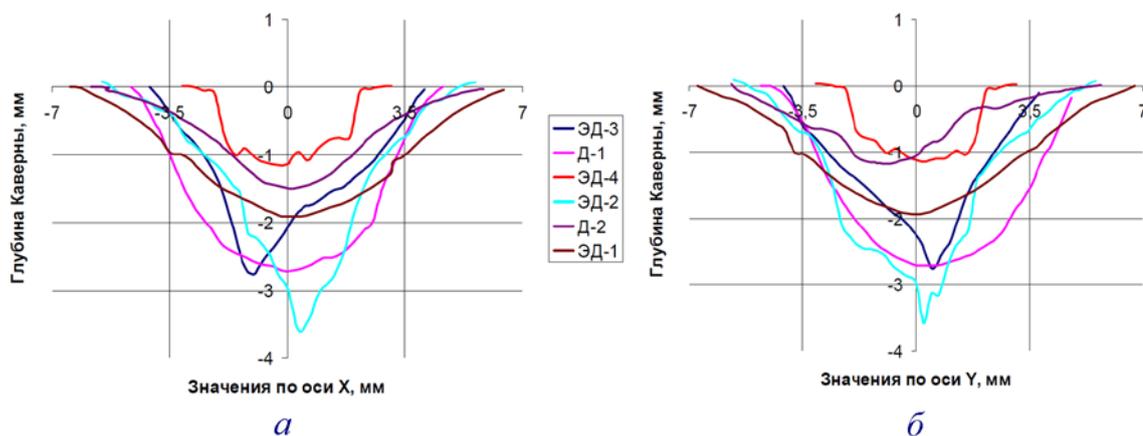
Ключевыми характеристиками основных средств инициирования детонации являются: время срабатывания (время от момента поступления импульса на срабатывание до момента выхода ударной волны на торец корпуса детонатора) и их инициирующая способность. Однако в данном контексте условимся говорить о характеристиках выходного импульса средства инициирования, так как понятие «инициирующая способность», во многом условно и зависит от того, что и каким путем будет инициироваться, а именно каков по своим характеристикам последующий элемент ОЦ и какой режим превращения в нем возможен.

Таким образом, основными типами несовершенств штатных средств инициирования являются: разброс времени срабатывания, амплитудно-временных и пространственно-временных характеристик выходного импульса.

Навеска ВВ (инициирующее или низкоплотное бризантное ВВ), воспринимающая начальный импульс, является основным источником появления разброса времени срабатывания и пространственно-временных характеристик выходного импульса детонатора. Другими словами, вся неопределенность и пространственно-временной разброс заложены именно в процессе инициирования горения и перехода его в детонацию.

Инициирующая способность детонаторов определяется по существу массой бризантного ВВ, в котором установился близкий к стационарному процесс. На практике опасно и технологически не удобно иметь унитарное средство взрывания больших масс и габаритов. По этой причине все средства инициирования детонации работают на пределе своей инициирующей способности.

Как правило, инициирующая способность (бризантное действие) детонаторов определяется косвенно по свидетелю (рис. 11) и впоследствии проверяется в реальной конструкции узла.



**Рис. 11.** Профили сечения каверн в алюминиевой пластине-свидетеле в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях *а* – *XOZ* и *б* – *YOZ* от воздействия электродетонаторов: ЭД-1, ЭД-2, ЭД-3, ЭД-4 и детонаторов, задействуемых от детонирующего шнура: Д-1, Д-2 [18]

С целью более детального исследования характеристик выходного импульса применяются одномерные или пространственные методы регистрации параметров процесса взрыва детонаторов [19]: лазерной доплеровской интерферометрии, высокоскоростной шпирен-фоторегистрации, высокоскоростной фоторегистрации свечения в зазоре, рентгенографии и т.д.

Так, тщательное рентгенографическое исследование позволило установить количественную картину поля для разлета элементов штатного электродетонатора с взрывающимся мостиком. Установлено, что окончательно основные осколочные потоки от детонатора формируются при значительных радиусах разлета  $r = (4...5)r_0$  и через времена порядка 10...15 мкс. При этом фрагментация корпуса детонатора на осколки начинается на базах  $(1,5...2,0)r_0$ . Полученные результаты дают следующие характеристики по скоростям разлета: дно детонатора приобретает скорость порядка 3,5 км/с, а его боковая образующая поверхность – 1,75 км/с. Приведенные данные подтверждают установленный факт, что наибольшей инициирующей способностью обладает дно детонатора и в меньшей степени его боковая цилиндрическая поверхность, которая в ряде случаев может рассматриваться как фактор, способствующий процессу инициирования.

В реальных конструктивных схемах ОЦ процесс набора скорости и разлета оболочки детонатора на начальной стадии ограничивается масштабами гарантированных технологических зазоров необходимых для обеспечения собираемости элементов ОЦ. В свою очередь начальная стадия разлета оболочки электродетонатора по своей природе в высшей степени нелинейная, что в основном и затрудняет систематическую экспериментальную регистрацию характеристик инициирующего импульса и определение статистических характеристик стабильности работы электродетонатора. В этой связи подчеркнем, что капсули-детонаторы или электродетонаторы являются в меньшей степени определенными элементами ОЦ.

По этой причине приходится использовать некие усредненные его характеристики с определенным запасом по инициирующей способности.

В этой связи с целью снижения влияния пространственно-временной неидеальности характеристик выходного импульса штатных средств инициирования в конструкциях устройств и узлов прецизионного направленного использования энергии взрыва следующий за электродетонатором элемент ОЦ (рис. 1), как правило, функционирует в составе юстирующего детонационно-волнового генератора.

## 2. Феноменологические составляющие неидеальности ударно-волнового инициирования и детонации зарядов ВВ

Рассмотренные выше типы несовершенств лежат в основе зарождения феноменологических составляющих неидеальности процессов ударно-волнового инициирования и детонации зарядов ВВ в составе ОЦ СП и БП.

Составляющие неидеальности процесса ударно-волнового *инициирования* зарядов гетерогенных ВВ представляет собой совокупность явлений и эффектов комплексной природы протекающих широком спектре пространственно-временных масштабов, обусловленных макро-неоднородностью физико-химических свойств заряда ВВ и характером инициирующего импульса. Условное разделение всей совокупности неидеальностей процесса инициирования на искажения формы поверхности фронта инициирующей ударной волны и на возмущения потока реагирующей среды за фронтом допускается лишь с учетом непосредственного взаимовлияния этих двух составляющих друг на друга в отличие от случая с детонацией.

К основным источникам неидеальности процесса ударно-волнового инициирования относятся следующие типы несовершенств (рис. 12):

- структурно-реологическая макронеоднородность заряда ВВ, как следствие влияния технологических несовершенств изготовления (снаряжения) зарядов ВВ, эксплуатационных и промежуточных функциональных воздействий на заряд ВВ;
- амплитудно-временные отклонения характеристик ударно-волнового импульса инициирования от номинальных, как следствие влияния технологических несовершенств изготовления и сборки элементов ОЦ, функциональные несовершенства работы штатных средств детонирования;
- пространственно-временная неоднородность инициирующего ударно-волнового импульса, как следствие влияния системно-методологических недочетов разработки и проектирования ОЦ СП и БП и их элементов, функциональных несовершенств работы штатных средств детонирования.



Рис. 12. Основные источники неидеальности процесса ударно-волнового инициирования детонации зарядов гетерогенных ВВ

Феноменологические составляющие неидеальности процесса *детонации* зарядов гетерогенных ВВ представляют собой взаимосвязанную совокупность явлений и эффектов, обусловленных появлением фронтальных и зафронтальных неоднородностей течения.

Под *фронтальными* будем понимать процессы, зарождающиеся непосредственно на фронте и далее интенсивно развивающиеся в зоне химической реакции (химпике) детонационной волны.

В свою очередь, под зафронтальными будем понимать процессы, интенсивно развивающиеся в нестационарной области разлета продуктов детонации ВВ.

К основным факторам, обуславливающим появление фронтальных эффектов неоднородности детонационного течения относятся (рис. 13):

- 1) гетерогенный механизм детонации: очаговый («горячих точек») или механизм вязкой поверхности [20];
- 2) исходная и приобретенная флуктуация чувствительности заряда ВВ;
- 3) граничные условия распространения детонационной волны (изменение динамической жесткости границы заряда ВВ (рис. 14) и т.п.);
- 4) геометрические (конструктивные) характеристики заряда ВВ (изменение направления распространения детонации (рис. 15), критическая геометрия заряда и т.п.), локально или всецело влияющие на устойчивость самоподдерживающегося режима распространения детонации.
- 5) области динамического изменения чувствительности заряда ВВ (зоны ударно-волновой десенсибилизации (рис. 16), сенсibilизации и т.п.);

Результатом отдельного или совокупного действия перечисленных факторов является зарождение и эволюция фронтальных неоднородностей (возмущений) гидродинамических характеристик потока реагирующей среды за фронтом детонационной волны. В зависимости от масштаба величин неоднородностей параметров исходной среды следует разделять линейную и нелинейную области взаимодействия квазистационарного потока реагирующей среды в области химпика с гидродинамическими возмущениями.

Фронтальные эффекты неоднородности детонационного течения непосредственно определяют появление нерегулярностей формы на поверхности фронта детонационной волны, искажая ее симметрию и тем самым, формируя асинхронность прихода детонационной волны к нагружаемым элементам конструкций взрывных устройств.

Трансляция фронтальных неоднородностей параметров потока реагирующей среды в зафронтальную область течения продуктов детонации является одним из основных факторов, обуславливающих появление *зафронтальных* неоднородностей детонационного течения.



Рис. 13. Факторы, обуславливающие фронтальные эффекты неоднородности детонационного течения

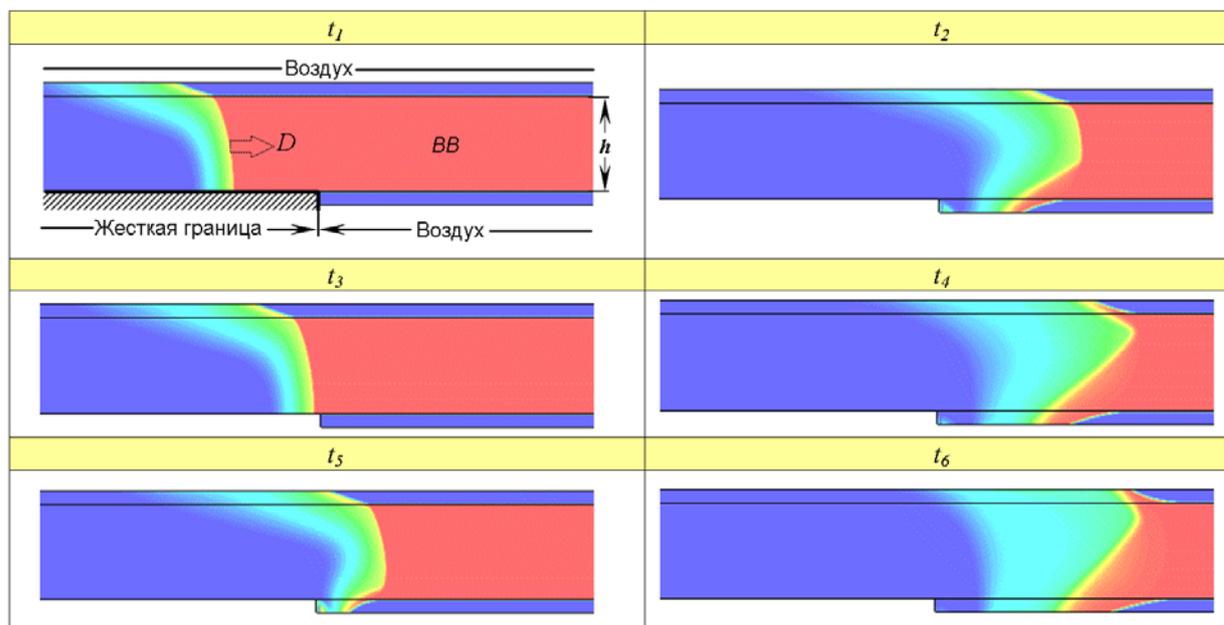


Рис. 14. Процесс срыва детонации в плоском заряде ВВ (октоген/ нитроцеллюлоза/пластификатор 94/3/3%,  $\rho_0=1.84 \text{ г/см}^3$ ,  $0.5h_{cr}<h<h_{cr}$ ), наполовину длины жестко ограниченном снизу. Распределения концентрации исходного ВВ

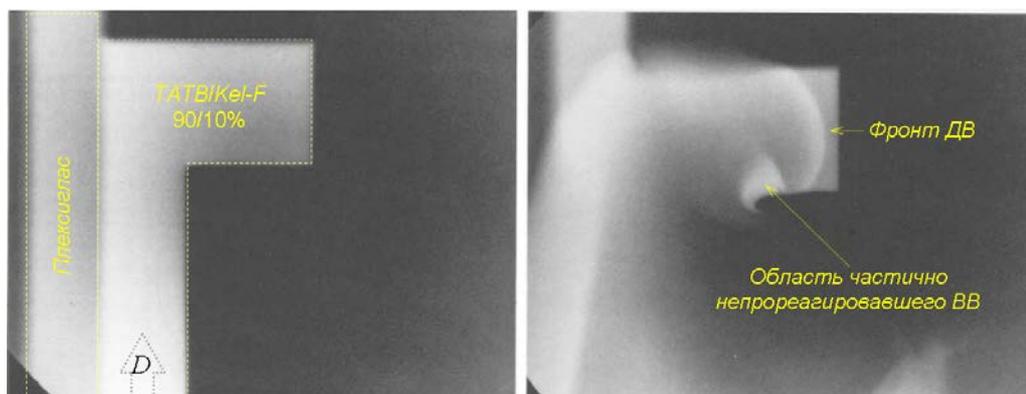


Рис. 15. Рентгенограмма процесса дифракции детонационной волны на угловой границе заряда ВВ (ТАТБ/флуорополимер (*Kel-F*) 90/10%,  $\rho_0=1.914$  г/см<sup>3</sup>) [21]

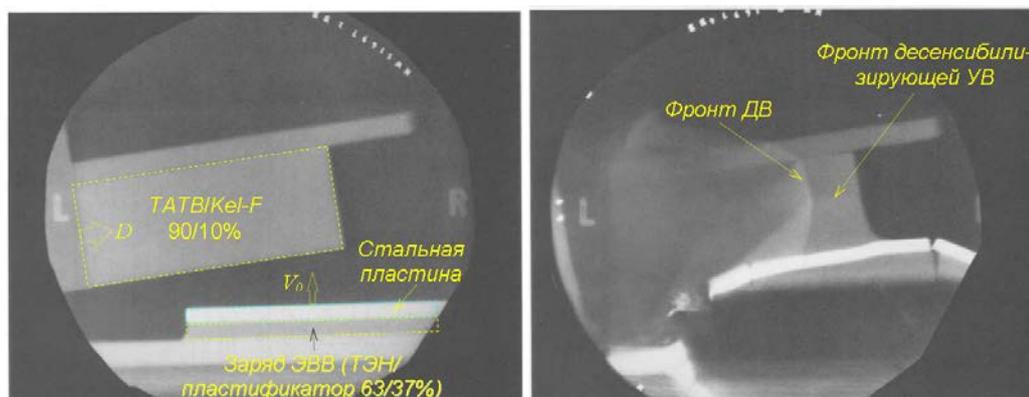


Рис. 16. Рентгенограмма взаимодействия детонационной волны с ударной волной, оказывающей локальное десенсибилизирующее воздействие на заряд ВВ (ТАТБ/флуорополимер (*Kel-F*) 90/10%,  $\rho_0=1.914$  г/см<sup>3</sup>) [21]

К основным факторам, обуславливающим появление зафронтальных эффектов неоднородности детонационного течения относятся (рис. 17):

- 1) трансляция фронтальных неоднородностей параметров потока реагирующей среды в область течения продуктов детонации;
- 2) топология инициирования и коллимирования детонации в заряде ВВ (многоточечное инициирование, дифракционное, отдельно-канальное коллимирование и т.п.);
- 3) области частично непрореагировавшего ВВ;
- 4) краевые эффекты взаимодействия потока продуктов детонации с окружающей заряд средой или материалом (эффекты поверхностной неустойчивости границы раздела сред, канальный эффект и т.п.).

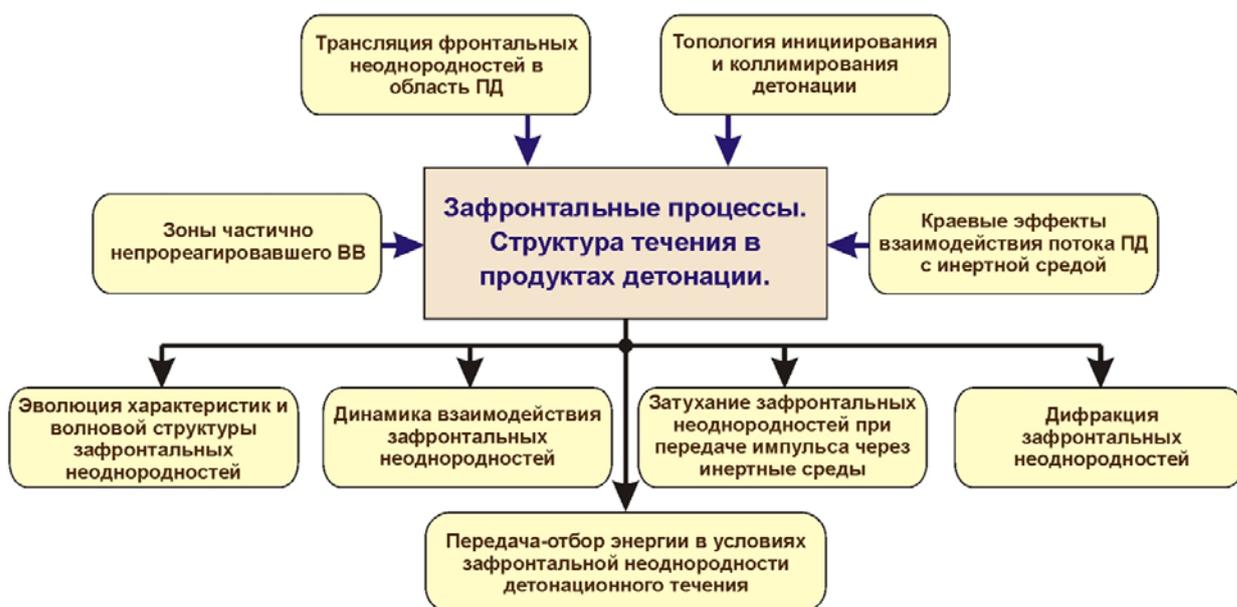


Рис. 17. Факторы, обуславливающие зафронтальные эффекты неоднородности детонационного течения

В условиях зафронтальной неоднородности детонационного течения процесс передачи-отбора энергии от продуктов детонации нагружаемыми элементами конструкции СП и БП (металлическими облицовками кумулятивных и снарядоформирующих зарядов и т.п.) отличается значительной пространственной немонотонностью своих характеристик.

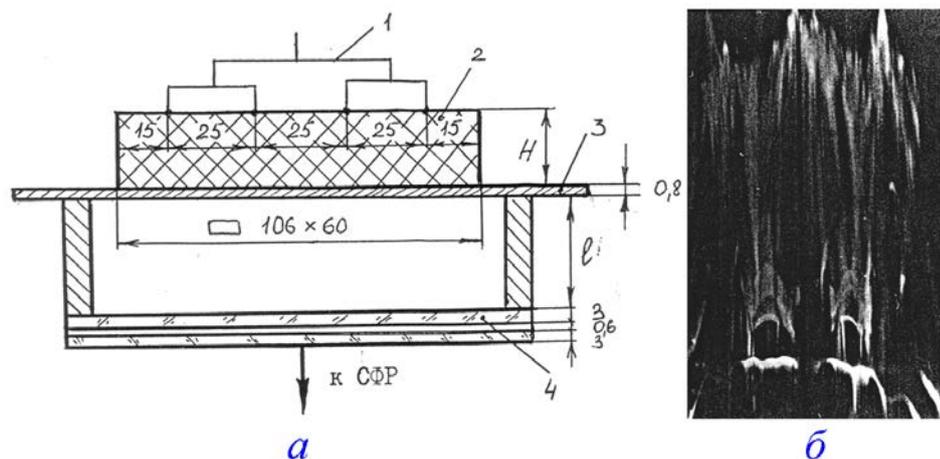


Рис. 18. Методика (а) и результаты экспериментального исследования формы метаемой пластины при многоточечном инициировании прямоугольного блока ВВ:

1 – четырехточечная система инициирования детонации, 2 – прямоугольный блок ВВ, 3 – метаемая пластина (медь, 0,8 мм), 4 – оптический блок с зазорами, заполненными аргоном,  $H = 14$  мм,  $l = 30$  мм, скорость развертки скоростного фоторегистратора (СФР)  $V_p = 3.75$  м/с. Щелевая фоторегистрация процесса метания и взаимодействия пластины с оптическим блоком (б)

Подобное неравномерное по своей интенсивности взрывное нагружение вызывает значительные искажения формы нагружаемых (метаемых) элементов, а в ряде случаев и множественную потерю сплошности материала (рис. 18).

## Заключение

Определяющим фактором повышения стабильности характеристик поражающего действия современных СП и БП, в основе боевого функционирования которых лежит прецизионно-направленная детонационно-волновая трансляция энергии взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (кумулятивные и снарядоформирующие и др. типы СП и БП), является качество работы элементов ОЦ. Качество функционирования элемента ОЦ определяется как надежностью инициирования детонации в последующем элементе, так симметрией и регулярностью поверхности фронта детонационной волны, а также зафронтальной однородностью детонационного течения. Основными источниками снижения качества функционирования элементов ОЦ являются:

- конструктивные несовершенства ОЦ;
- технологические несовершенства изготовления деталей и сборки ОЦ;
- функциональные несовершенства штатных средств детонирования;
- несовершенства технологии снаряжения СП и БП ВВ, а также эксплуатационные и промежуточные функциональные воздействия, обуславливающие появление структурной неоднородности зарядов ВВ.

Указанные факторы обуславливают появление структурно-реологической макронеоднородности заряда ВВ в совокупности с амплитудно- и пространственно-временными отклонениями характеристик инициирующего импульса от номинальных. Искажения формы фронта детонационной волны и флуктуаций потока продуктов взрыва вызываются переходными процессами на этапах инициирования и распространения детонации в зарядах ВВ конечных размеров сложной геометрической формы в условиях нерегулярности инициирующего импульса и наличии структурных дефектов заряда.

## Литература

1. Современные средства поражения бронетанковой техники: учебное пособие для вузов / М.С. Воротилин [и др.] М.: Изд-во ТулГУ, 2005. 516 с.
2. Средства поражения и боеприпасы / А.В. Бабкин [и др.] М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
3. М. С. Воротилин, А. Н. Чуков, Л. Н. Шмариков. Боеприпасы. Современное состояние и тенденции развития. М: Изд-во ТулГУ, Ч. 2, 2010. 476 с.
4. Ugrčić M. The Study of the Use Possibility of the Semi-Destructive Method for the Shaped Charge Quality Testing // Proc. of 20<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics. Orlando, 2002. P.635-643;
5. Soloviev V.S. Detonation Instability as one cause of non-ideal shaped charge jet formation // Proc. of Int. Seminar on fundamental problems of cumulation. St-Petersburg, 1997. P.145-152.
6. Соловьев В.С., Козырев А.В. Анализ процесса зарождения и развития асимметрии детонационного течения в кумулятивных зарядах с инертными линзами // Оборонная техника, 2002. №1-2. С.71-79.
7. Свирский О. В. Тенденции развития кумулятивных средств поражения БТТ по данным открытых зарубежных источников // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2006. №3. С.46-51.
8. В.Д. Баскаков, В.И. Колпаков, О.А. Кружков, Н.В. Шикунов. Анализ влияния кинематических возмущений технологической природы на траекторию движения формируемого взрывом удлиненного поражающего элемента // Труды межд. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 2007. С. 581–584.
9. В.И. Колпаков, В.Д. Баскаков, О.А. Кружков, Н.В. Шикунов. Оценка влияния технологических факторов на кинематические параметры удлиненного поражающего

- элемента кумулятивного заряда // Труды межд. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». Саров, 2007. С.585–589.
10. Dual Mode Warhead Technology for Future Smart Munitions / Bender D. [et al.] // Proc. of 19<sup>th</sup> Int. Symp. of Ballistics. Interlaken, 2001. P.679-684.
  11. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1. – 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. 920с.
  12. В.Д. Баскаков, В.А. Тарасов. Методология принятия решений по обеспечению рациональной точности боеприпасов. // Сб. докл. науч. конф. Волжского регион. центра РАН "Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения". Саров, 2008. Т.2, 567 с.
  13. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ: Учебное пособие для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 397с.
  14. Asay B. Non-Shock Initiation of Explosives. М.: Springer, 2010. 617 p.
  15. Соловьев В.С., Аттетков А.В., Пырьев В.А. Исследование микроструктуры литых составов // Детонация. Вып. 2. Черноголовка, 1981.
  16. Characterization of thermally degraded energetic materials / Renlund A. [et al.] // Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Symp on Detonation. Snowmass Village, 1998.
  17. Peterson P.D., Mang J.T., Asay B.W. Quantitative analysis of damage in an octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazonic-based composite explosive subjected to a linear thermal gradient // J. Appl. Phys, 2005. V. 979, №9. P.493-507.
  18. Метод оценки бризантного действия инициаторов / Б.Г. Лобойко [и др.] // Труды межд. конф. “X Забабахинские научные чтения”. Снежинск, 2010.
  19. One & Two Dimensional Diagnostics for Detonators & Boosters / S.A. Clarke [et al.] // Proc. of Weapons Engineering LASL Lab NDIA Fuze Conf. Los Alamos, 2007.
  20. Физика взрыва / С.Г. Андреев [и др.]. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 1. 832 с.
  21. Mader Ch. LASL PHERMEX Data Volume III. Berkeley: University of California Press, 1980. 527p.

## **Non-ideal initiation and propagation of detonation in the equipment of ammunition as a factor of stability characteristics of the damaging effect reducing**

**77-30569/291153**

**# 11, November 2011**

**Kozyrev A.V., Soloviev V.S.**

Bauman Moscow State Technical University  
[sm4@sm.bmstu.ru](mailto:sm4@sm.bmstu.ru)

The article deals with the effects of non-ideal initiation and propagation of detonation in the equipment of weapons and ammunition, the basics of principles of operation of which is directed detonation-wave transmission of the explosion energy of charges of condensed explosives. The main causes of these effects and their influence on the functioning of explosive devices are analyzed. The data on the degree of influence of this factor on the stability characteristics of the damaging effect of modern high-performance ammunition was offered for cumulative and shell forming types, designed to destroy armored vehicles at long range.

---

**Publications with keywords:** [high explosive](#), [initiation](#), [non-ideality](#), [ammunition](#), [detonation](#)  
**Publications with words:** [high explosive](#), [initiation](#), [non-ideality](#), [ammunition](#), [detonation](#)

---

### Reference

1. M.S. Vorotilin., et al., Modern means of destruction of armored vehicles, Moscow, Izd. TulGU, 2005, 516 p.
2. A.V. Babkin., et al., Means of defeat and ammunition, Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana - BMSTU Press, 2008, 984 p.
3. M. S. Vorotilin, A. N. Chukov, L. N. Shmarakov., Ammunition. A current state and development tendencies, Part 2, Moscow, Izd. TulGU, 2010, 476 p.
4. Ugrčić M., The Study of the Use Possibility of the Semi-Destructive Method for the Shaped Charge Quality Testing, in: Proc. of 20th Int. Symp. on Ballistics, Orlando, 2002, pp. 635-643.
5. Soloviev V.S., Detonation Instability as one cause of non-ideal shaped charge jet formation, in: Proc. of Int. Seminar on fundamental problems of cumulation, St-Petersburg, 1997, pp. 145-152.
6. Solov'ev V.S., Kozyrev A.V., Oboronnaia tekhnika 1-2 (2002) 71-79.

7. Svirskii O.V., *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk* 3 (2006) 46-51.
8. V.D. Baskakov, V.I. Kolpakov, O.A. Kruzhkov, N.V. Shikunov, in: Proc. of Int. Conf. «IX Kharitonov topical scientific readings», Sarov, 2007, pp. 581–584.
9. V.I. Kolpakov, V.D. Baskakov, O.A. Kruzhkov, N.V. Shikunov, in: Proc. of Int. Conf. «IX Kharitonov topical scientific readings», Sarov, 2007, pp. 585–589.
10. Bender D., et al., Dual Mode Warhead Technology for Future Smart Munitions, in: Proc. of 19th Int. Symp. on Ballistics, Interlaken, 2001, pp. 679-684.
11. Anur'ev V.I., in: I.N. Zhestkova (Ed.), Handbook of designer constructor - industrial engineer: in 3 vol., Vol. 1, Moscow, Mashinostroenie, 2001, 920 p.
12. V.D. Baskakov, V.A. Tarasov, in: Proc. of scientific conference of the Volga regional centre RARAN "Modern methods of design and testing of missile and artillery weapons, Sarov, vol. 2, 2008, 567 p.
13. Generalov M.B., The basic processes and apparatus of technology of industrial explosives, Moscow, IKTs «Akademkniga», 2004, 397 p.
14. Asay B., Non-Shock Initiation of Explosives, Moscow, Springer, 2010, 617 p.
15. Solov'ev B.C., Attetkov A.V., Pyr'ev V.A., *Detonatsiia* 2 (1981).
16. Renlund A., et al., Characterization of thermally degraded energetic materials, in: Proc. of 11th Int. Symp on Detonation, Snowmass Village, 1998.
17. Peterson P.D., Mang J.T., Asay B.W., Quantitative analysis of damage in an octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazonic-based composite explosive subjected to a linear thermal gradient, *J. Appl. Phys.*, 979 (9) (2005) 493-507.
18. B.G. Loboiko, et al., in: Proc. of international conference “X Zababakhin scientific readings”, Snezhinsk, 2010.
19. S.A. Clarke, et al., One & Two Dimensional Diagnostics for Detonators & Boosters, in: Proc. of Weapons Engineering LASL Lab NDIA Fuze Conf., Los Alamos, 2007.
20. S.G. Andreev, et al., Physics of explosion, Vol.1, Moscow, FIZMATLIT, 2002, 832 p.
21. Mader Ch., LASL PHERMEX Data, Volume III, Berkeley, University of California Press, 1980, 527 p.