

2. В.Н. Герман, Н.В. Завьялов, А.М. Злобин, Т.Е. Кирсанова, Т.Г. Кирьянова, Е.С. Козлова, Л.Е. Корнилова, С.А. Новиков, Ю.П. Орликов, А.П. Погорелов, В.А. Сеницин, А.К. Фисенко, Л.В. Фомичева, Ю.А. Хохлов. Исследование воздействия импульсного электронного облучения на взрывчатый состав на основе октогена. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика, 1992г, вып.3, стр.19-23.
3. В.Н. Герман, Н.В. Завьялов, А.М. Злобин, Т.Е. Кирсанова, Т.Г. Кирьянова, Е.С. Козлова, Л.Е. Корнилова, С.А. Новиков, Ю.П. Орликов, А.П. Погорелов, В.А. Сеницин, А.К. Фисенко, Л.В. Фомичева, Ю.А. Хохлов. Воздействие электронного облучения на взрывчатое вещество ТАТБ. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика, 1995г, вып.3/1, стр. 49-53.

ВНУТРЕННИЕ ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛОВ И ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ВВ

В.М. Бельский, Д.В. Мильченко

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Для того, чтобы иметь возможность целенаправленно разрабатывать ВВ с заданной детонационной способностью (критический диаметр, сечение, толщина детонирующего слоя), необходимы физически обоснованные представления о факторах, обуславливающих эти размеры.

Ещё Ю.Б.Харитоновым была сделана попытка связать критический диаметр детонации ВВ со скоростью химического превращения в зоне химической реакции [1]

$$d_{кр} \approx 2c\tau_r, \quad (1)$$

где c , τ_r – средняя скорость звука и время реакции в зоне химической реакции соответственно. Время реакции τ_r обратно пропорционально средней скорости разложения ВВ $W_{ср}$ в зоне химической реакции: $\tau_r \approx 1/W_{ср}$.

Формула Харитона в большинстве случаев дает сильно заниженные против экспериментальных значения $d_{кр}$; разница может достигать 1-2 порядков величины [2].

Более детальный анализ [3], учитывающий схему течения в зоне химической реакции детонационной волны с искривленным фронтом, показал, что критический диаметр детонации ВВ зависит не от средней скорости разложения ВВ в зоне химической реакции $W_{ср}$, а от начальной скорости разложения ВВ $W_{нач}$ непосредственно после ударного сжатия.

В соответствии с [3, 4] критический диаметр заряда ВВ, допускающего стационарное распространение детонации, определяется по формуле

$$d_{кр} = \frac{4Uc^2 \cos \varphi_{сг}}{Q_{рв} \Gamma W_{нач}} \quad (2)$$

где U – массовая скорость во фронте детонационной волны, c – скорость звука в ударно - сжатом ВВ, $Q_{рв}$ – тепловой эффект разложения ВВ при постоянных давлении и объёме, Γ – параметр Грюнайзена, $W_{нач}$ – начальная скорость разложения ВВ за фронтом детонационной волны, $\varphi_{сг}$ – угол наклона детонационного фронта к плоскости заряда, обеспечивающий стационарность ударного фронта.

Реакция разложения ВВ за фронтом детонационной волны идет по очаговому механизму [5], поэтому скорость разложения в общем случае определяется как концентрацией очагов (P, T), так и начальной скоростью их роста (горения) в индивидуальном очаге $u(P, T)$:

$$W = \frac{d\alpha}{dt} \approx N \cdot u(P, T) \quad (3)$$

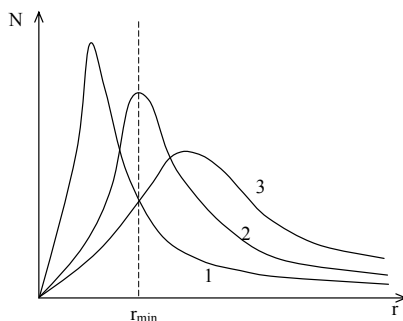
В итоге формула, определяющая зависимость критического диаметра от параметров ВВ, будет иметь вид

$$d_{кр} = \frac{4Uc^2 \cos \varphi_{cm}}{Q_{pv} \Gamma N(P, T) u(P, T)} \quad (4)$$

Отсюда следует, что, вообще говоря, влиять на критические размеры детонации ВВ можно путём изменения:

- теплового эффекта разложения ВВ (традиционный путь),
- концентрации очагов в единице объема и
- скорости роста (горения) индивидуального очага.

Возможности увеличения теплоты взрыва мощных бризантных ВВ на сегодня практически исчерпаны. По-видимому, нет реальных предпосылок для создания новых ВВ с теплотой взрыва более 1800 ккал/кг и при этом имеющих приемлемую чувствительность. (ВВ с горючими добавками, например алюминизированные, в этом аспекте не рассматриваются, т.к. подавляющая часть «добавочной» теплоты при их взрыве выделяется далеко за фронтом детонации). Поэтому в целом для двух образцов ВВ одинаковой плотности, большая начальная скорость разложения $W_{нач}$ будет наблюдаться для того образца, который содержит относительно большую концентрацию внутренних дефектов, способных при ударном сжатии стать эффективными очагами реакции разложения. При этом на их размеры имеется ограничение «снизу», определяемое равенством в очаге скоростей тепловыделения и теплоотвода. Оценки, выполненные в [3] для очага, образованного при вязкопластическом схлопывании поры, для большинства индивидуальных мощных ВВ дают минимальный размер очага, равный ~ 1 мкм. С учетом этого результата общая концентрация эффективных очагов, а, следовательно, и скорость реакции разложения на фронте детонационной волны, будет определяться фактическим их распределением по размерам. Это положение качественно иллюстрируется графиками рисунка 1, на котором для трёх гипотетических взрывчатых составов представлены три различных распределения.



r_{min} – минимальный размер очага, при котором возможно его зажигание за счет разогрева при вязкопластической деформации

Рисунок 1. Качественный вид распределения внутренних дефектов по размерам для трёх различных ВВ

Из графиков рисунка 1 видно, что общее количество внутренних дефектов закономерно возрастает от состава 1 к составу 3.

В технологическом процессе получения ВВ дефекты, которые могут стать эффективными очагами разложения в детонационной волне, образуются в частицах на макро – (поры, трещины), мезо – (дефекты роста, микропоры) и микроуровнях (дислокации) одновременно.

На количество, размер и активность пор в образовании очагов разложения ВВ могут существенно влиять следующие факторы:

- Форма и размер частиц (кристаллов). Чем менее правильной является огранка кристаллов ВВ, чем более разветвлена их поверхность – тем больше межзеренных пор, выше $W_{нач}$ и меньше $d_{кр}$.

- Наличие связующего, его адсорбция и распределение на кристаллах. Связующее, распределяясь по поверхности кристаллов ВВ, может полностью или частично заполнять те ее участки, которые в противном случае образовали бы межзеренную пору на границе частиц. Кроме того, связующее может дезактивировать дефекты, обладающие избыточной свободной энергией – например, открытые микротрещины или выходы дислокаций.

Из-за вклада связующего, зависимость детонационной способности ВВ от дисперсности его частиц носит, как правило, различный характер для индивидуальных и смесевых ВВ.

Для индивидуальных ВВ хорошо известной закономерностью является снижение критических размеров детонации с уменьшением средних размеров частиц. Например, в работе [6] были получены данные о критической толщине детонации полуограниченных (жесткая подложка с одной стороны) прессованных тонкослойных зарядов гексогена различной дисперсности, представленные ниже на рисунке 2

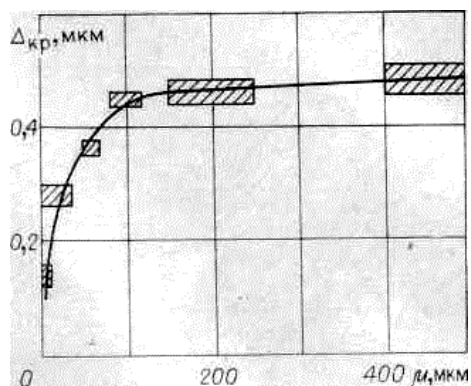
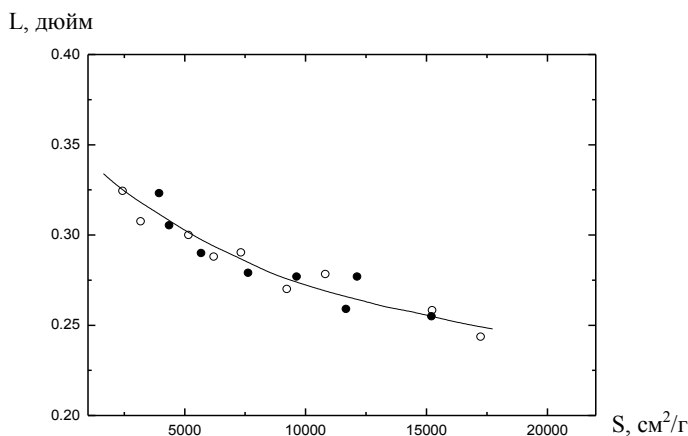


Рисунок 2. Зависимость критической толщины детонационноспособного слоя $\Delta_{кр}$ от размера зерна, полученная для гексогена

Границы заштрихованных прямоугольников соответствуют по вертикали наименьшим (из испытывавшихся) значениям толщины, когда детонация проходит по всей длине слоя (Δ_{min}^+), и наибольшим, когда детонация затухает (Δ_{max}^-) а по горизонтали — размерам ячеек сит, между которыми отбиралась фракция.

Однако для пластичных и эластичных смесевых ВВ на основе гексогена такая прямая связь размеров частиц и критических размеров детонации отсутствует. Так, для многих исследованных образцов пластичного ВВ на основе гексогена различных партий, значения критического сечения детонации (для прутков прямоугольного сечения, в планке с поворотами), изменялись от $1,6 \times 3,0$ мм² до $3,2 \times 3,0$ мм² без какой-либо систематической связи с величиной удельной поверхности, которая составляла от ≈ 700 см²/г до ≈ 1500 см²/г. Образцы пластичного ВВ, приготовленные на перекристаллизованном высокодисперсном гексогене с более высокой удельной поверхностью $S_{уд} = 4000 - 7000$ см²/г, не проявили тенденции к повышению детонационной способности.

В случае пластифицированного ТЭНа, при увеличении удельной поверхности наполнителя с $600 - 1000$ см²/г до $3500 - 5000$ см²/г критический диаметр детонации снижается весьма сильно – с $1,0 - 1,2$ мм до $0,3 - 0,4$ мм. Однако при дальнейшем росте дисперсности снижения критического диаметра не наблюдается. Более того, для порошкообразного ТЭНа без связующего [7] наблюдалось снижение ударно-волновой чувствительности (определявшейся по толщине экрана L) при диспергировании тэна от 2500 см²/г до 20000 см²/г (рисунок 3).



o - ТЭН, перекристаллизованный из ацетона; • - ТЭН, механически измельченный

Рисунок 3. Зависимость ударноволновой чувствительности порошкообразного тэна плотностью 0,95 г/см³ от удельной поверхности его частиц (S)

Интересно, что снижение ударноволновой чувствительности описывается одной зависимостью как для механически измельченного, так и для перекристаллизованного ТЭНа. На наш взгляд, это свидетельствует об определяющем, в данном случае, влиянии внутренних дефектов в кристаллах на чувствительность ВВ. При осаждении кристаллов из раствора, образование в них дефектов роста или захват газовых пузырьков становятся менее вероятными с уменьшением размера кристаллов. С другой стороны, при механическом размоле кристаллов измельчение происходит преимущественно по наименее прочным участкам, т.е. как раз по изначально имевшимся дефектам, и число потенциальных «горячих точек» в ВВ снижается. В итоге, в любом случае имеем снижение ударно-волновой чувствительности при диспергировании.

С помощью метода термовакuumной возгонки (сублимации ВВ при нагревании в вакууме, с последующим осаждением на подложку) можно получить слои различных ВВ, устойчиво детонирующие при толщине в несколько десятков мкм – например, для ТЭНа до 50-70 мкм, для БТФ до 15-25 мкм [8]. На поверхности осажденного слоя сублимированных ВВ (рисунок 4) хорошо видны микронного и субмикронного размера дефекты роста и микропоры, которые, как считается, и играют роль «горячих точек», значительно повышая начальную скорость $W_{нач}$ разложения ВВ при ударно-волновом воздействии и соответственно снижая критическую толщину детонирующего слоя.

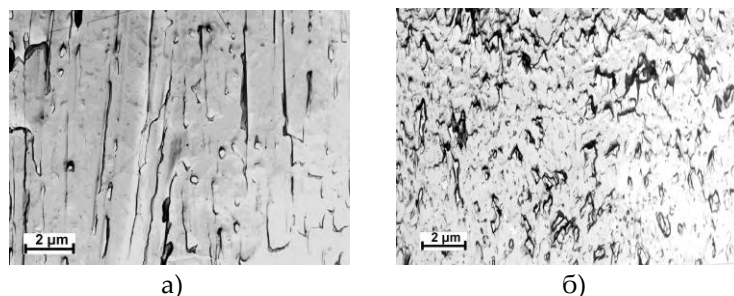


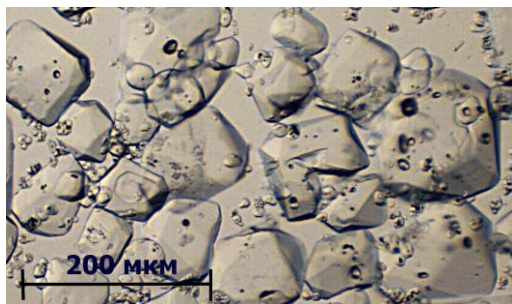
Рисунок 4. Излом (а) и тыльная сторона (б) осажденного слоя сублимированного ТЭНа на подложке

В результате проведенных исследований мы выяснили далее, что в некоторых случаях (не для всех ВВ) высокая детонационная способность сохраняется у сублимированного ВВ не только в компактном слое, но и в порошкообразном виде, в том числе в составе смесевых ВВ. Наряду с этим сопоставление структурных и газодинамических данных показывает, что содержание «внутренних»

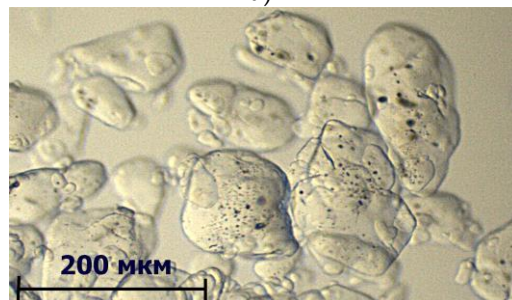
дефектов в кристаллах ВВ может в определенных ситуациях оказывать преобладающее влияние на величину критической толщины (критического диаметра детонации), при различных технологиях синтеза или переработки ВВ.

Ниже такая ситуация проиллюстрирована на примере гексогена. Внутренние дефекты в кристаллах гексогена можно визуализировать, делая микрофотографии кристаллов в среде иммерсионной жидкости, имеющей сходный с монокристаллом ВВ коэффициент преломления. (Мы использовали для этой цели нитробензол). В этом случае кристаллы правильного строения выглядят почти прозрачными, а внутренние дефекты видны как черные включения.

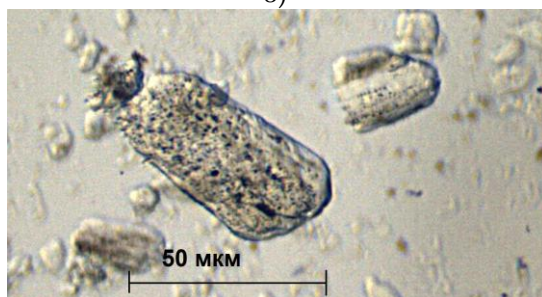
На рисунке 5 (а-в) представлены фотографии кристаллов гексогена из трех образцов. Первые два снимка (а) и (б) относятся к кристаллам гексогена заводского производства, а третий (в) – это фотография фрагмента, полученного измельчением осажденного слоя сублимированного гексогена.



а)



б)



в)

Рисунок 5. Микрофотографии «малодефектного» (а) и «среднедефектного» (б) гексогена заводского производства и «высокодефектного» (в) гексогена, переработанного методом термовакuumной возгонки

Наглядно видно увеличение числа «закрытых» пор и уменьшение их размера от (а) к (в). При этом следует отметить, что удельная поверхность всех образцов составляла в диапазоне от 1200 до 2000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Далее на основе каждого из образцов гексогена по единой методике были изготовлены образцы пластифицированного ВВ с углеводородным связующим и определены их критические сечения детонации в прутках прямоугольного сечения ($3 \times h$) мм^2 . По мере увеличения количества закрытых дефектов и уменьшения их размеров, показатель h снизился от ~ 3 мм для т.н.

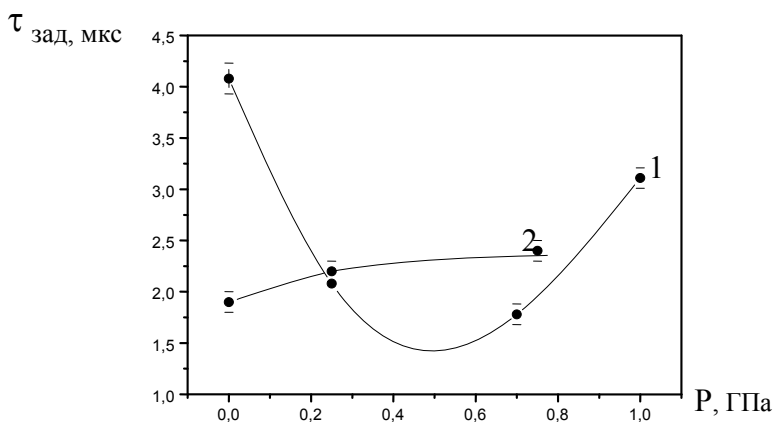
«малодефектного» образца (а) до 1,7-1,8 мм для «среднедефектного» образца (б) и еще более существенно, до 0,7-0,9 мм для «высокодефектного» образца гексогена (в), полученного вакуумной сублимацией. Кроме того, в дополнительном эксперименте был изменен режим измельчения сублимированного гексогена, в результате чего удельная поверхность была снижена до 750-800 см²/г. Приготовленное из него пластифицированное ВВ также показало величину критического сечения около 3,0×0,9 мм². Это наглядно показывает, что по крайней мере для некоторых ВВ именно «внутренняя» дефектность, а не величина удельной поверхности может оказывать основное влияние на критические размеры детонации.

Влияние внутренних дефектов на микроуровне (подвижных дислокаций) на ударноволновую чувствительность и критический диаметр детонации иллюстрируется экспериментальными данными, полученными на водонаполненном гексогене (гексоген - 82 ± 0,4%, вода - 18 ± 0,4%) начальной плотностью 1,570 ± 0,003 г/см³ [9]. Выбор объекта был обусловлен тем, что водонаполненные ВВ (в отличие от пластичных ВВ) в значительной мере сохраняют начальную структуру частиц и их распределение по размерам в процессе приготовления исследуемых образцов. Кроме того, как показывают исследования (см. например [10]), физическая картина развития ударной волны до детонационной в водонаполненных и твердых гетерогенных ВВ одинакова. Поэтому достоверно оценить влияние внутренних дефектов, в частности, аннигиляции дислокаций на механизм возникновения очагов локальной химической реакции наиболее просто именно на примере водонаполненных систем.

В работе [9] были получены данные о временах задержки детонации для образцов гексогена с различной предысторией. В одной серии опытов в качестве исходного использовали гексоген заводского производства; его образцы предварительно подвергались нагружению ударной волной с давлениями ниже порога инициирования: 0,25; 0,7 и 1 ГПа. В другой серии опытов гексоген предварительно перекристаллизовывали из растворителя с целью получить малодефектные кристаллы с минимальным количеством примесей. Их также предварительно нагружали слабой ударной волной.

С помощью рентгенофазового анализа в образцах перекристаллизованного гексогена, подвергнутого ударному воздействию было выявлено накопление поврежденности в кристаллах при сохранении, в целом, их механической сплошности.

Зависимость времени задержки водонаполненного гексогена, подвергнутого предварительной ударноволновой обработке, от давления обработки представлена на графике рисунка 6.

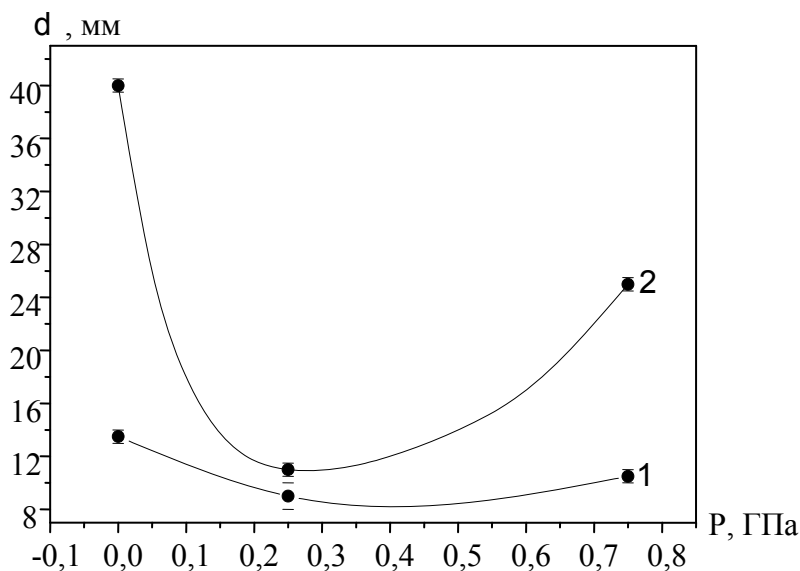


1 – перекристаллизованный гексоген; 2 – гексоген заводского изготовления

Рисунок 6. Зависимость времени задержки детонации ($\tau_{\text{зад}}$) водонаполненного гексогена от давления предварительного ударного воздействия (P)

Как видно, зависимости для гексогена заводского производства и предварительно перекристаллизованного «малодефектного» существенно различаются. Время задержки детонации для перекристаллизованного гексогена без предварительного ударного воздействия более чем в 2 раза превышает тот же показатель для штатного гексогена. Предварительное ударное воздействие на перекристаллизованный гексоген в определенном диапазоне интенсивностей УВ приводит к значительному снижению времени задержки, примерно в 2-2,5 раза. Это выглядит вполне логичным результатом отмеченного выше накопления повреждений в кристаллах при предварительном ударном воздействии. При дальнейшем возрастании интенсивности предварительного нагружения до 1 ГПа, время задержки детонации в обработанных образцах снова увеличивается. Подобный характер зависимости наилучшим образом может быть объяснен накоплением и последующей аннигиляцией подвижных дислокаций кристаллической структуры, образующихся при нагружении. При этом минимальному времени задержки детонации соответствует максимально возможная плотность подвижных дислокаций. Гипотеза об образовании очагов разложения в ударно сжатом ВВ в результате аннигиляции подвижных дислокаций была сформулирована в [11].

В отличие от перекристаллизованного «малодефектного» гексогена, в частицах гексогена заводского изготовления уже присутствует максимально возможная (или близкая к ней) плотность подвижных дислокаций, поэтому ударно-волновая обработка приводит только к ее уменьшению, и, следовательно, к возрастанию времени задержки детонации (см. кривую 2 рисунка 6).



1 – критический диаметр, 2 – предельный диаметр

Рисунок 7. Зависимость критического и предельного диаметров водонаполненного гексогена от давления предварительного ударного воздействия

На рисунке 7 представлены прямые результаты измерений критического и предельного диаметров детонации водонаполненного гексогена, подвергнутого предварительному ударному воздействию разной интенсивности.

Они имеют качественно тот же характер, что и представленные выше зависимости для времени задержки детонации.

Обращает на себя внимание, что при определенном уровне ударного воздействия на исследуемый образец соотношение между предельным и критическим диаметрами ВВ резко меняется. Для предварительно не нагружавшихся образцов $d_{пред}/d_{кр} \approx 2,8$, а после нагружения ударной волной с давлением 0,25 ГПа это соотношение сокращается до $d_{пред}/d_{кр} \approx 1,3$. То есть, при том содержании структурных дефектов, которое обеспечивает минимальные критические размеры

заряда, выход скорости детонации на плато при увеличении размеров заряда происходит наиболее быстро. В этой связи интересно отметить, что для упоминавшихся выше сублимированных ВВ обладающих малыми критическими диаметрами детонации, разница между критическими и предельными размерами детонации также не превышает 1,5 раз [8]. А в некоторых случаях при уменьшении толщины детонирующего слоя сублимированного ВВ наблюдали стационарную скорость детонации вплоть до появления отказов, $d_{пред}/d_{кр} \approx 1,0$.

Таким образом, кинетическое поведение ВВ в ударных волнах (ударноволновая чувствительность, детонационная способность) определяется исходным (базовым) состоянием структуры образца взрывчатого вещества на макро – мезо – и микроуровнях (степенью отклонения реальной кристаллической структуры от идеальной), существенно зависящей от способа его приготовления. Даже небольшие (в пределах допуска) изменения в технологическом процессе получения и переработки ВВ могут приводить к заметному изменению дефектной структуры их частиц и, как следствие, к изменению кинетического поведения конечного продукта. Невоспроизводимость дефектной структуры частиц ВВ в технологическом процессе и есть главная причина невозможности кинетического поведения ВВ. Поэтому для целенаправленного управления кинетическим поведением (ударноволновой чувствительностью и детонационной способностью) взрывчатых веществ в технологическом процессе при изготовлении ВВ следует научиться регулировать не только распределение частиц по размерам, но и дозировано изменять в нужном направлении дефектность структуры частиц взрывчатого вещества на всех уровнях: концентрацию подвижных дислокаций, блоков, внутрикристаллических пор, примесей и поверхностных дефектов.

Требуется своего рода «тонкая настройка» методов кристаллизации индивидуальных ВВ, позволяющая по усмотрению экспериментатора изменять количество и размер внутрикристаллических дефектов в частицах индивидуальных ВВ. Разработка таких методов находится пока лишь в самой начальной стадии своего становления. Тем не менее, исходя из имеющегося опыта, уже сейчас можно выделить некоторые направления, представляющиеся перспективными для дальнейшей разработки в целях регулирования критических размеров детонации ВВ:

1. Термоудар, т.е. нагревание исходного порошка ВВ до определенной температуры с последующим резким его охлаждением. Его эффективность показывают экспериментальные результаты работы [12], в которой путем подобной обработки критический диаметр детонации литого тротила был снижен более чем в два раза. Для достижения необходимого уровня ударноволновой чувствительности или значения критического диаметра детонации конкретного ВВ температуру нагрева, температуру и скорость охлаждения, а также кратность повторения термоудара необходимо подбирать экспериментально. Достоинством этой технологии является то, что она достаточно проста, дешева и при условии отработки требуемых режимов относительно легко может быть внедрена в производство. Недостаток же состоит в том, что оптимальные режимы температурного воздействия зависят от структуры исходного ВВ и, соответственно, могут изменяться от партии к партии ВВ.

2. Кристаллизация в присутствии порообразователей. Закрытые поры в структуре кристаллов могут образовываться, например, при кристаллизации из смешанных растворителей, содержащих компоненты с заметно различающимися температурами кипения. При этом температура среды должна поддерживаться выше точки кипения легкокипящего компонента растворителя. Захват микроскопических пузырьков пара растущими кристаллами приводит к образованию в них закрытых пор. В качестве примера на рисунке 8 приведена фотография пластинчатого кристалла гексогена в образце, осажденном из смеси толуол-ацетон при температуре, превышающей точку кипения ацетона.

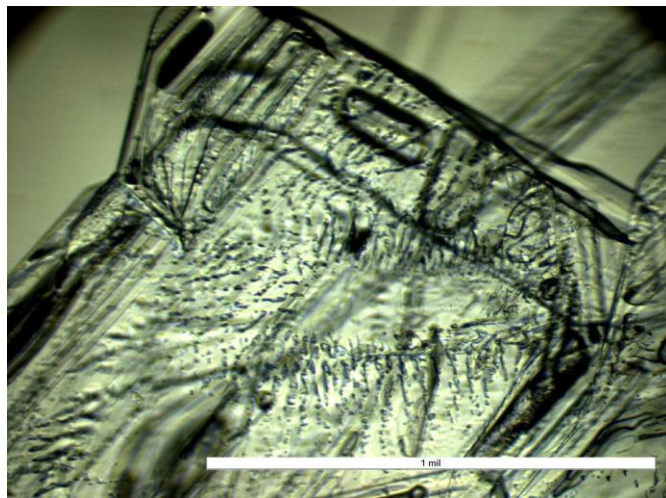


Рисунок 8. Микроструктура кристалла гексогена, полученного методом испарительной кристаллизации из смешенного растворителя

Другой путь состоит в использовании добавок, разлагающихся с выделением газов, например, бикарбоната натрия или бикарбоната аммония.

Данный метод требует очень точного воспроизведения условий кристаллизации. Небольшие изменения температур и концентраций могут существенно изменить структуру перекристаллизованного продукта. В свою очередь, химические газообразующие добавки могут вызывать нежелательные побочные реакции и загрязнять ВВ.

3. Кристаллизация из газовой фазы (термовакuumная возгонка, сублимация). Это метод [8] уже был упомянут выше. При правильном подборе условий кристаллы сублимированного ВВ содержат значительное количество закрытых пор микронного и субмикронного диапазона, и имеют существенно повышенную детонационную способность. (Чувствительность к удару, трению и тепловым воздействиям при этом сохраняется на исходном уровне). Не все ВВ могут быть подвергнуты термовакuumной сублимации. Некоторые имеют недостаточную летучесть, некоторые недостаточно стабильны в условиях вакуума. Достоинство метода – универсальность, стабильность результатов применительно к переработке различных партий одного и того же ВВ.

4. Введение в объем взрывчатого вещества небольшого количества микродобавок (легирование). При определенной степени структурного соответствия молекул добавки и основного ВВ, такая процедура может теоретически привести к увеличению числа дислокаций в кристалле и к соответственному повышению детонационной способности. Имеются неполные, но заслуживающие дальнейшей экспериментальной проверки сведения о том, что примеси дипентаэритритгексанитрата (т.н. «димер ТЭНа») в ТЭНе повышают детонационную способность смесевых ВВ на основе ТЭНа. То же, по-видимому, относится к примесям октогена в гексогене. Интересным вариантом является введение добавок, ускоряющих начальные стадии разложения ВВ в очагах реакции (увеличивается множитель $\alpha(P,T)$ в выражении (4)). Добавка 5 % азида натрия NaN_3 к ТНТ привела к уменьшению времени задержки детонации с 0,382 мкс до 0,323 мкс [13]. Коэффициент запрессовки исследуемых зарядов в обоих случаях был равен 0,995, а инициирование осуществлялось ударом тонких металлических пластин диаметром 100 мм, разгоняемых пневматической пушкой. Стоит подчеркнуть, что азид натрия, в отличие от большинства других азидов, не является инициирующим ВВ, нечувствителен к удару и трению и имеет температуру начала интенсивного разложения $T_{\text{нир}}$ более 275 $^{\circ}\text{C}$. Поэтому малые добавки NaN_3 не должны увеличивать опасность обращения с «легированным» ВВ и, вероятно, данный на первый взгляд экзотический метод заслуживает в будущем самого пристального внимания и изучения.

В целом упомянутые выше непростые задачи повышения детонационной способности ВВ при сохранении их уровня безопасности являются одними из актуальных в зарождающейся в настоящее время нанотехнологии взрывчатых веществ.

Список литературы

1. Харитон Ю.Б. О детонационной способности взрывчатых веществ // Вопросы теории взрывчатых веществ: Сб.ст. (М., Л.). 1947. Вып.1 С. 7-28.
2. Михайлюк К.М., Трофимов В.С. О возможном газодинамическом пределе распространения стационарной детонации // Физика горения и взрыва, 1977, Т.13, № 4. С. 606-613.
3. И.Ф.Кобылкин, В.В.Селиванов, В.С.Соловьёв, Н.Н.Сысоев. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М. Физматлит, 2004, 376 с.
4. И.Ф.Кобылкин, В.В.Селиванов. Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ. М. Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015, 354 с/
5. А.Я.Апин, Л.Н.Степик. О механизме химической реакции при детонации сплошных взрывчатых веществ. ПМТФ 1965, №2, стр. 146-149.
6. Г.Т.Афанасьев, В.И. Бедов, О.И.Сергиенко. Детонационная способность твердых ВВ при высокой плотности. // Физика горения и взрыва, 1981, т.17, №2, с.158-159.
7. R.H.Dinegar, R.H.Rochester, M.S.Millican. Effect of specific surface on the shock sensitivity of pressed granular PETN. Explosivstoffe 1963, №9, p. 188-189.
8. Д.В.Мильченко, В.А.Губачев, Л.А.Андреевских, С.А.Вахмистров, А.Л.Михайлов, В.А.Бурнашов, Е.В.Халдеев, А.И.Пятойкина, С.С.Журавлев, В.Н.Герман. Нано-структурированные ВВ, получаемые методом осаждения из газовой фазы. Особенности структуры и взрывчатых свойств. // Физика горения и взрыва, 2015, т.51, № 1, с.96-101.]
9. В.М.Бельский, Л.Е.Корнилова. Зависимость чувствительности водонаполненного гексогена к инициирующей ударной волне от давления предварительного ударного воздействия. Материалы VI Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. 23-26 сент., 1980, Алма-Ата. Сб. Детонация. Черногловка, 1980, с.46-48.
10. К.К.Шведов, А.Н.Дремин, А.Л.Кривченко, Н.А.Мурашова, В.С.Коздов. "Инициирование детонации ударной волной в водонаполненном гранулированном тротиле. ФГВ 1974, № 4, стр. 561-568.
11. Дубнов Л.В., Сухих В.А., Томашевич И.И. К вопросу о природе локальных микроочагов разложения конденсированных ВВ при механических воздействиях. ФГВ т.7, №1, 1971, стр.147-149.
12. В.В.Кравцов, В.В.Сильвестров. Влияние низкой температуры на параметры детонации литого тротила. ФГВ 1979, т.15, №3, стр.119-124.
13. F.E.Walker. Quantum mechanics and molecular dynamics calculation provide new evidence for a free radical shock initiation model. Propellants, Explosives, Pyrotechnics 1982, v7, p.2-7.

РАСЧЕТЫ НИЗКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОСКОЛКОВ С ОБРАЗЦОМ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА ПО ДВУМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ КРИТЕРИЯМ

С.Ю. Седов, В.Б. Вершинин, А.И. Кондрашенко

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Низкоскоростной режим взрывчатых превращений (НСР ВП) начинается с теплового взрыва в горячем пятне (ГП), формирующемся во взрывчатых веществах (ВВ) в процессе низкоскоростных нагрузок. В ГП предполагается действующим диссипативный источник энергии, повышающий температуру T_h , и интенсифицирующий за счет этой температуры химические реакции.