

ОБРАЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ РАЗОГРЕВОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ПРИ УДАРЕ

Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, Ю. А. Казарова,
Ю. Ф. Карабанов
(Москва)

Изучение механизма разрушения тонких слоев представляет интерес в связи с задачами чувствительности взрывчатых веществ к механическим воздействиям. Механическое инициирование твердых ВВ, как было показано ранее [1], происходит в процессе разрушения заряда, если давление всестороннего сжатия превосходит критическое. Критическим согласно [2] является такое давление $p_{кр}$, которое повышает точку плавления ВВ, служащую границей локального деформационного разогрева [3, 4], до уровня критической температуры очагового теплового взрыва. Величины $p_{кр}$ для распространенных вторичных ВВ составляют десятки килобар [1, 5]. Поскольку прочность ВВ, как правило, значительно меньше (10^2 — 10^3 кг/см²), такое давление при разрушении может быть получено лишь в особых условиях деформации. Наиболее распространенным примером этого является деформация в тонких слоях. Независимо от условий деформации образование локальных разогревов связывают с диссипацией энергии на поверхностях скольжения или разрушения [1, 3].

В ряде случаев, используя теорию пластичности, можно предвидеть расположение поверхностей разрушения и на модельных зарядах проверить справедливость предположений. Так, например, в опытах с зарядами, припудренными азидом свинца, было показано, что такими поверхностями при нагружении в приборе № 2 (рис. 1, а) являются контактные плоскости, а не средняя плоскость [1]. При этом, однако, индикатором обнаружения поверхности разрушения служит взрыв, и тем самым используются соображения о механизме его инициирования. Более заманчивым является наблюдение картины разрушения на материалах, механически подобных взрывчатым веществам. С точки зрения выявления неизотермических эффектов особенно интересными должны быть вещества, в которых при нагревании происходят необратимые и легко контролируемые изменения. Известны, например, вещества — термоиндикаторы, необратимо изменяющие цвет при нагревании. Эти вещества являются, как правило, комплексными соединениями или кристаллогидратами, и изменение их цвета связано с распадом комплекса или потерей кристаллизационной воды. Из веществ такого типа, испытывавшихся при ударе, многие либо взрывались (например, бихроматы), либо воспламенялись и сгорали после удара (некоторые комплексные соли уротропина), что может свидетельствовать о возникновении высокотемпературных разогревов. После длительных поисков было найдено вещество ($C_6H_5O_7Fe \cdot 3H_2O$ — кристаллогидрат лимоннокислого железа — ЛКЖ), которое в значительной степени удовлетворяет поставленным требованиям.

На образцах, отпрессованных из порошка растертого ЛКЖ, после разрушения при ударе появляются темно-коричневые, в известной мере концентрические полосы, характеризующие остаточную картину разрушения (рис. 2, а). Эти полосы располагаются примерно на равных расстояниях друг от друга; общий рисунок на верх-

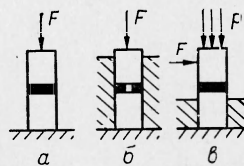


Рис. 1.

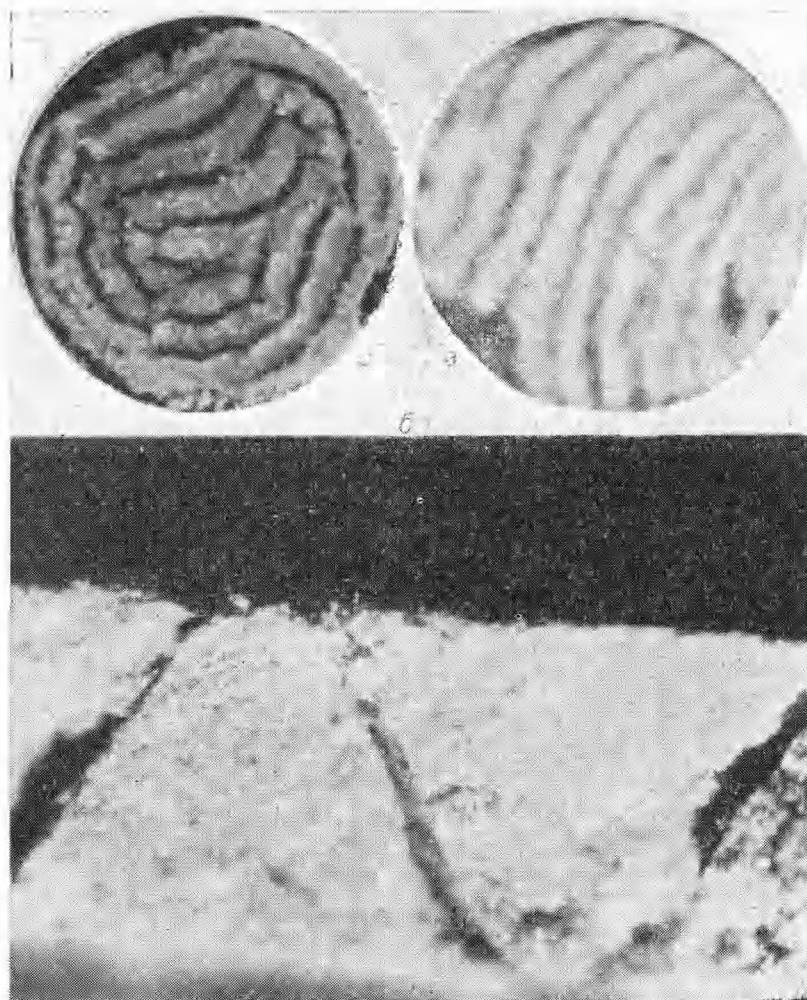


Рис. 2.

ней и нижней контактных плоскостях очень сходен, однако полосы верхней плоскости проходят между полосами нижней. Верхние и нижние полосы соединяются между собой тонкими темно-коричневыми прослойками, образующими в образце, если не учитывать их толщины, конические поверхности. Таким образом, полосы на контактных поверхностях можно рассматривать как линии пересечения этих поверхностей, фотография поперечного разлома образца показана на рис. 2, б. Под микроскопом темно-коричневые полосы и пересекающие образец прослойки выглядят как стекловидная плавившаяся масса; тонкий стекловидный слой полностью покрывает также контактные плоскости, однако в полосах количество и толщина залегания темного вещества значительно больше. Кроме дисков были испытаны прямоугольные и треугольные в плане образцы и, кроме того, по схеме, изображенной на рис. 1, б, кольца. Можно отметить, что во всех случаях полосы имеют тенденцию располагаться перпендикулярно по линиям наименьшего сопротивления. Идеальной картины, однако, получить не удалось, по видимому, из-за неоднородности образцов, характерной для тонких слоев [1].

Для установления механического подобия ЛКЖ и взрывчатых веществ измерялось давление при ударе по дискам различной толщины. Полученные осциллограммы давления (рис. 3, а, метки времени на нижнем луче следуют через 100 мксек, осциллограф ОК-24 В) аналогичны таковым для твердых ВВ: после деформации, близкой к упругой, происходит разрушение, которое сопровождается выбросом части образца

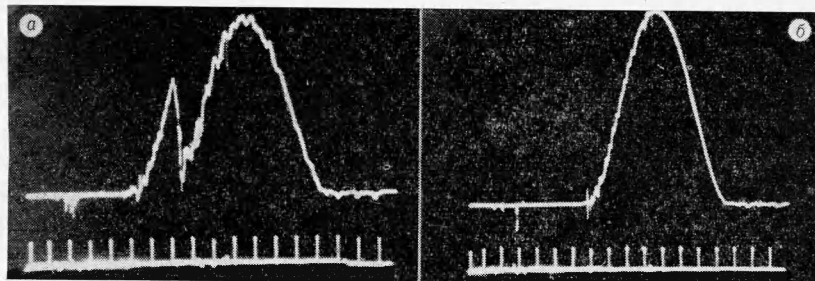


Рис. 3.

и спадом давления. Зависимость давления $\bar{p}_{пр}$, при котором происходит разрушение, от начальной толщины диска h_0 описывается той же зависимостью, что и для ВВ:

$$\bar{p}_{пр} = \sigma_{пр} \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h_0} \right), \quad (1)$$

где $\sigma_{пр}$ — предел прочности (для ЛКЖ он составляет 1300 кг/см²) и D — диаметр диска ($D=10$ мм). Если энергия удара меньше, чем требуется для достижения $\bar{p}_{пр}$, то диск не разрушается и сохраняет исходный вид, а осциллограмма получается такой же, как при холостом ударе (рис. 3, б). В некоторых случаях при этом вблизи периметра намечается появление полосы, свидетельствующей о том, что разрушение диска начинается со свободной поверхности. Сам процесс разрушения, как видно из осциллограммы, показанной на рис. 3, а, происходит чрезвычайно быстро. Толщина образца при разрушении существенно уменьшается: может выбрасываться больше половины диска; при этом оставшаяся часть практически полностью занимает пространство между пуансонами.

Геометрически представить измерение расстояний между полосами и ограничение изменения толщины при разрушении позволяет весь ход разрушения.

Разрушение колец (внешний диаметр 10 мм, внутренний — 2 мм) происходит с незначительным уменьшением толщины образца (5%), и геометрия поверхности разрушения фиксируется почти такой же, какой она была в момент образования. При этом разлом образца по диаметру выглядит как бы составленным из идеальных треугольников, а угол наклона прослоек, пересекающих образец, оказывается равным $\pm 34-35^\circ$. Интересно отметить, что этот угол практически совпадает с углом наклона линий скольжения при растяжении полосы, полученным в теории пластичности ($35^\circ 16'$) [6]. Последовательное чередование знака угла и тем самым треугольность элементов, наблюдающихся на разломе, по-видимому, объясняется требованием совместности деформаций. Осмотр разлома разрушившихся дисков с толщиной h , сильно отличающейся от

начальной h_0 (на рис. 2, б показан образец, толщина которого уменьшалась примерно на одну треть), показывает, что вершины треугольников, прилегающие к контакту, исчезают и элементом разлома становится правильная трапеция. Таким образом, уменьшение толщины при разрушении можно представить как встречное движение треугольников по вертикали, которое приводит также к радиальному перемещению треугольников, а затем трапеций. Вершины треугольников этим радиальным движением стираются. Расчет угла наклона по остаточной картине полос на контактной плоскости дает для диска 30° и для прямоугольника — 27° . В среднем (для всех опытов независимо от схемы нагружения) этот угол составляет 30° , т. е. треугольники при своем образовании близки к равносторонним.

В работе [1] в качестве энергетического источника локального разогрева рассматривалась упругая энергия, запасенная в образце; теперь в соответствии с представленной выше картиной разрушения к ней нужно добавить упругую энергию, запасенную в пуансонах до разрушения. Визуализацию картины разрушения, полученную на образцах ЛКЖ, естественно рассматривать как следствие диссипации энергии на поверхностях разрушения и вызванного ею разогрева и разложения вещества. Для качественного понимания химических процессов в ЛКЖ при нагреве было проведено дериватографическое исследование исходного вещества и части образца после удара. Скорость нагрева составляла 15° в минуту. При этом ЛКЖ теряет сначала одну молекулу ($\sim 130^\circ$), а затем и две оставшиеся молекулы воды ($\sim 165^\circ\text{C}$). Судя по небольшому положительному тепловому эффекту, измеряемому вслед за этим, происходит перестройка кристалла в новую модификацию. Далее ЛКЖ разлагается в две стадии без плавления.

Образец после удара представлял смесь темно-коричневого вещества и вещества, не изменившего цвет, которое естественно считать исходным. Чтобы заметить результат химического превращения, при разрушении темно-коричневого вещества, стремились отобрать как можно больше. Воды в такой пробе оказалось на 20% меньше как при отщеплении одной молекулы воды, так и последующих двух. Отсюда следует, что в пробе содержится 20% вещества, потерявшего воду в результате разрушения. Дальнейший ход дериватограммы также имеет отличия: резко сократилась первая стадия распада — накопление катализатора (по-видимому, его достаточно накопилось в процессе разрушения и при последующем остывании) и уменьшилась общая потеря веса. Если принять, что в распаде при ударе принимало участие 20% всей пробы, то глубина «локального» разложения безводного ЛКЖ составила 10%. Таким образом, можно считать доказанным, что ЛКЖ при разрушении заметно разлагалось, что же касается изменения цвета, то ЛКЖ темнеет на воздухе при обычном нагревании до 130°C , т. е. уже при потере первой молекулы кристаллизационной воды.

Аналогичную картину разрушения можно было бы наблюдать и с помощью некоторых других веществ. Например, кристаллогидрат уксуснокислого кобальта, имеющий в порошке розовую окраску, после удара дает фиолетовые полосы, однако рисунок получается менее контрастным, чем на образцах ЛКЖ. Испытывались также двойные механические смеси ЛКЖ с лимонной кислотой, полиметилметакрилатом, перхлоратом аммония, тротилом и т. д. Использование в качестве компонентов веществ различной природы преследовало цель проверить, насколько справедливы для других систем выводы по геометрии и характеру разрушения, полученные на образцах ЛКЖ. Соотношение компонентов в смесях было различным, но чаще всего составляло 1:1. Изменение состава сме-

сей и процентного содержания компонентов позволяло в широких пределах варьировать механические свойства исследуемых систем. Для всех смесей снимались осциллограммы давления при ударе и было зафиксировано хрупкое поведение образцов (см. рис. 3, а). В экспериментах со смесями ЛКЖ с перхлоратом аммония и тротилом при толщине образца меньше некоторой критической происходил взрыв. Опыты показали, что для всех испытанных систем механизм разрушения один и тот же и не зависит от предела прочности, размер же ограниченных поверхностями разрушения элементов (треугольников на разломе) определяется начальной толщиной образца.

После того как выяснилось расположение поверхностей разрушения — поверхностей разрыва скоростей деформаций, становится понятной остаточная картина разрушения, которая иногда наблюдается при отсутствии взрыва на твердых ВВ. На рис. 2, в дана фотография рельефа вещества (гексоген), оставшегося после удара на пуансоне и прилипшего к нему (прилипание, по-видимому, вызвано плавлением на контактной плоскости). В опытах с ЛКЖ сколь-нибудь заметной адгезии вещества к пуансону не наблюдалось, что может быть объяснено выделением воды. Родственность полученного рельефа (см. рис. 2, в) и структуры разлома (см. рис. 2, б) очевидна: на пуансонах остаются трапеции, примыкающие к ним большой стороной.

Остановимся кратко на процессе разрушения при испытании по схеме Боудена — Козлова (см. рис. 1, в). В работе [5] по результатам возбуждения было сделано заключение об эквивалентности процесса деформации в условиях этой схемы, приведенной на рис. 1, а, если давление прижатия и толщина заряда соответствуют кривой прочности. Опыты с ЛКЖ, кривая прочности которого показана на рис. 4, а, подтверждают этот вывод: остаточная картина деформации при давлении ниже кривой также имеет полосы, но они охватывают только часть образца со стороны удара. Соответственно и темные прослойки на разломе имеются только в этой части образца. Заметного уменьшения толщины при этом не происходит. Чем ближе координаты испытания (h_0, \bar{p}) к кривой прочности, тем большая часть контактных плоскостей охватывается рисунком полос. И наконец, в условиях, соответствующих кривой прочности, остаточная

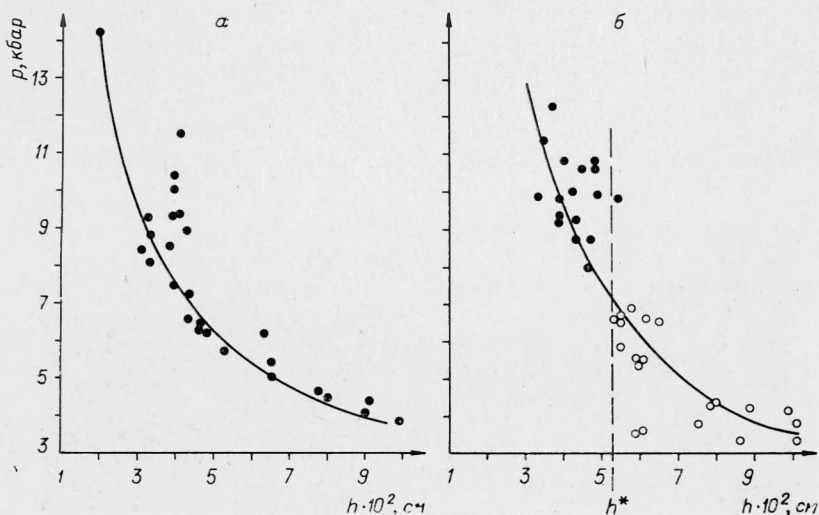


Рис. 4.

картина разрушения совпадает с описанной ранее (см. рис. 2, а, б) и наблюдается значительный выброс вещества из областей сжатия.

Как говорилось вначале, температура плавления и ее зависимость от давления играют в теории механического инициирования твердых ВВ важную роль. В работах [1—4] приводятся физические соображения о температуре плавления как границе разогрева, о возможности плавления на поверхностях разрушения и факторах, препятствующих перегреву жидкой фазы, однако прямых доказательств того, что при разрушении могут появляться расплавленные прослойки, нет. Темные полосы и прослойки на разрушенных образцах ЛКЖ, которые под микроскопом воспринимаются как плавившиеся, могут оказаться результатом фазового превращения в твердом состоянии; к тому же неизвестна температура плавления ЛКЖ. Зная теперь, что поверхности разрушения пересекают образец и соединяют контактные плоскости, можно для проверки возможности плавления воспользоваться резким отличием электропроводности твердой и жидкой фаз, имеющим место, например, для ионных кристаллов. Метод электрической проводимости широко используется при исследовании чувствительности для фиксации момента взрыва при ударе. Электрические схемы, применявшиеся в данной работе, позволяют измерять сопротивление образца от омов до сотен килоомов. К сопротивлению выше 100 ком измерительная схема нечувствительна, а при сопротивлении образца порядка омов и меньше регистрируется максимальный сигнал. Практически во всех описываемых ниже опытах сигнал, если он регистрировался, был максимальным.

Типичные осциллограммы давления с записью проводимости на нижнем луче даны на рис. 5. Поскольку схема подключена через груз, запись проводимости в конце удара всегда прерывается. Если образец при ударе разрушается, а проводимость не возникает, то осциллограмма имеет такой же вид, как на рис. 3, а. В тех случаях, когда давление удара недостаточно для разрушения образца, для всех диэлектриков регистрируются осциллограммы типа приведенной на рис. 3, б. Испытания производились по схеме, изображенной на рис. 1, а. Отметим, что возникновение проводимости, если оно вообще имеет место, всегда связано с моментом разрушения. Таким образом, возникновение проводимости тесно связано с образованием поверхностей разрушения.

Остановимся сначала на экспериментах с ионными соединениями NaCl, AgNO₃ и NH₄NO₃. Зависимость давления $\bar{p}_{пр}$, при котором происходит разрушение, от толщины диска для NaCl показана на рис. 4, б (кривая соответствует $\sigma_{пр} = 2200 \text{ кг/см}^2$). Разрушение сопровождается появлением проводимости только для достаточно тонких образцов (темные точки), т. е. при толщине h_0 , меньше некоторой критической h^* . Для

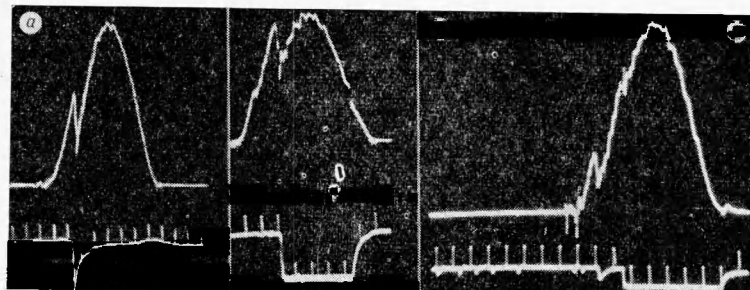


Рис. 5.

образцов большей толщины проводимость не возникает (светлые точки). Оценки с использованием зависимостей удельного сопротивления NaCl в твердой фазе от температуры и температуры плавления от давления показывают, что наблюдаемая проводимость образцов с толщиной порядка h^* может быть связана только с расплавом. Таким образом, на поверхностях разрушения может происходить плавление. Отсутствует ли плавление при разрушении образцов, толщина которых больше h^* ? Этот вопрос, нам кажется, следует рассматривать вместе с другим, а именно: почему через некоторое время (от 10 до 200 мксек) проводимость теряется. Потеря проводимости, очевидно, связана с кристаллизацией вещества, прилегающего к холодным пуансонам. Таким образом, потеря проводимости, а в равной мере и ее отсутствие не обязательно исключают существование расплава на поверхностях разрушения, проходящих внутри образца. Аналогично с NaCl ведут себя $AgNO_3$ и NH_4NO_3 , имея свои значения $\sigma_{пр}$ и h^* . Следует заметить, что при нахождении критического напряжения аммиачноселитряных составов и смесей горючего с перхлоратом аммония замыкание пуансонов не всегда указывает на момент инициирования, так как оно может быть связано с ионной проводимостью расплава окислителя. Например, при испытании смесей NH_4NO_3 с тротилом встречаются такие случаи (рис. 5, в), когда проводимость при первом разрушении возникает из-за плавления окислителя, а при втором — из-за взрывчатого разложения.

Кроме ионных солей испытывались низкомолекулярные органические вещества (лимонная и янтарная кислоты, дифениламин, стрептоцид, гексахлорбензол, нафталин, антрацен, ЛКЖ и др.) и полимеры (полиметилметакрилат и полипропилен). Для всех этих соединений обнаружена проводимость при разрушении в области тонких слоев (кроме ЛКЖ, у которого проводимость при разрушении имеет место во всем интервале испытывавшихся толщин $0,2 \text{ мм} \leq h_0 \leq 1 \text{ мм}$). Величина h^* для этих веществ составляет 0,2—0,3 мм, а их температуры плавления (исключая полимеры) при давлениях, соответствующих h^* , имеют порядок 400—600° С. Трудно дать однозначное объяснение проводимости столь разных органических веществ. Несомненно только, что проводимость связана с разогревом на поверхностях разрушения. Для некоторых из них в качестве механизма образования носителей электрических зарядов можно предположить диссоциацию при высоких температурах. Другую причину проводимости, по-видимому, следует искать в механизме термического распада. Аналогичное затруднение имеется при объяснении некоторых опытов по горению: вблизи поверхности горения баллиститного пороха (~400° С) обнаружена значительная электронная проводимость [8]. Если будут найдены конкретные доводы в пользу разложения, то инициирование твердых ВВ и возникновение проводимости у инертных органических веществ можно будет рассматривать на общей кинетической основе.

Поступила в редакцию
2/XII 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., «Наука», 1968.
2. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 125, 570.
3. В. А. Сухих и Ю. Б. Харитон. Сб. «Вопросы теории взрывчатых веществ», вып. 1.
4. Ф. Ф. Боуден и А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких взрывчатых веществах. М., ИЛ, 1955.
5. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, В. И. Долгов. Третий всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Черноголовка, 1971.

6. Т. Томас. Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М., «Мир», 1964.
7. E. K. Rideal, A. I. Robertson. Proc. Roy. Soc., 1948, A195, 135.
межвузовской конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, Изд-во ОГУ, 1969.
8. В. С. Логачев, П. Ф. Похил, А. С. Дмитриев. Матер. 9-й республиканской М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947, стр. 149.

УДК 662.215.1

О ДЕТОНАЦИИ НАПОЛНЕННЫХ ВВ В ЗАРЯДАХ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Г. В. Димза
(Москва)

Исследованию детонации в зарядах, диаметры которых близки к критическим, посвящено много работ. Предполагается, что в жидких ВВ и монокристаллах процесс развивается по механизму адиабатического теплового взрыва [1, 2]. Величина критического диаметра детонации $d_{кр}$ должна быть такой, чтобы время реакции $\tau_{кр}$, [3].

$$\tau \leq \frac{2d_{кр}}{3D_{кр}}, \quad (1)$$

было сопоставимо с временем задержки адиабатического теплового взрыва для данного ВВ в соответствующих условиях сжатия (т. е. при тех же давлениях, которые развиваются при детонации в критических условиях).

В порошкообразных и пористых ВВ разогрев от сжатия волной обычно недостаточен для осуществления объемной химической реакции, и считается, что превращение их в детонационный волне может принимать форму взрывного горения [4]. В последнем случае, помимо разогрева за счет ударного сжатия, существенное влияние на время завершения процесса оказывает плотность заряда, размер частиц ВВ, наличие примесей, и т. д. Твердо установленный факт влияния размера зерна ВВ на величину критического диаметра детонации считается одним из основных доводов в пользу механизма взрывного горения. Однако многое в процессе до настоящего времени является дискуссионным, и мнения по этому вопросу существенно различаются.

В этой связи следует остановиться на работах А. Н. Дремина с сотрудниками [2, 5, 6], где описаны опыты по определению с помощью электромагнитной методики времени реакции при детонационном превращении в зарядах разных диаметров (близких, значительно больших и критических) для ряда ВВ, в том числе тротила и гексогена с разным размером частиц. Разницы во временах химической реакции у исследованных ВВ с сильно различающимися размерами зерен при условии одинаковых давлений детонации замечено не было. Последнее объяснено выравниванием условий процесса в результате дробления зерен ударной волной до одинаковой, минимальной, величины с последующим тепловым взрывом мелких частиц (авторы называют предложенную схему механизмом «очагового теплового взрыва»). Ими же показано, что дробление зерна ВВ происходит уже при воздействии волны с амплитудой 1,5—2,0 кбар. В итоге авторы ставят под сомнение возможность протекания процесса по механизму взрывного горения, предполагающего сгорание зерен с поверхности вглубь.