

3. В. Г. Абрамов, Д. А. Ваганов, Н. Г. Самойленко. Докл. АН СССР, 1975, 224, 1, 116.
4. А. Г. Мержанов, Е. Г. Зеликман, В. Г. Абрамов. Докл. АН СССР, 1968, 180, 3, 639.
5. А. Н. Тихонов. Матем. сб., 1952, 31, 3, 575.

## О РОЛИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЗМЕ РАЗОГРЕВА ВВ ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

*Е. Г. Баранов, О. Н. Оберемок, Е. А. Семенюк  
(Днепропетровск)*

В случае инициирования твердых ВВ слабыми ударно-волновыми импульсами с величиной давления  $p \sim 10$  кбар и ниже оказывается проблематичным выявление очагов реакции, приводящих к развитию процесса до детонации при таких условиях [1, 2]. Перспективный подход изложен в работе [3], где подчеркнута роль структурных несовершенств (дислокаций) кристаллической решетки ВВ как носителей свободной энергии, аннигиляция которых при ударном нагружении может обеспечить движущую силу химической реакции при детонационном разложении вещества. Однако дислокационная интерпретация микроочагов разогрева («горячих точек») не вполне удобна в прикладном отношении. Поэтому имеет смысл обратить внимание на роль тесно связанных с дислокациями структурных несовершенств другого класса, а именно, на роль трехмерных микрополостей (микрокаверн), статистически распределенных в материале твердых ВВ. Влияние таких микродефектов обычно не учитывается при исследованиях ВВ, хотя их значение может оказаться достаточно существенным, поскольку, как известно, они определяют реальную прочность твердых тел, являясь концентраторами («локальными очагами») напряжений при приложении разрушающих нагрузок [4].

Не могут ли такие микрокаверны оказаться «горячими точками» при инициировании ВВ? Их обычные размеры ( $R \sim 10^{-4}$  см) и характеристики пространственного распределения не противоречат такому предположению, но проблема состоит в установлении механизма разогрева. В этой связи следует принять во внимание явление захлопывания («залечивания») микрокаверн под действием импульса сжимающих напряжений. Такой подход использовался в случае жидких ВВ (ЖВВ), где наиболее эффективным признан пузырьковый механизм возбуждения взрыва, основанный на разогреве жидкости при схлопывании газовых и кавитационных пузырей [5].

Есть основания предполагать, что подобный механизм имеет место и в случае твердых ВВ, поскольку их поведение при динамических нагрузках порядка 10 кбар допустимо описывать в гидродинамическом приближении. При этом речь идет не о разогреве содержимого пузырька, а о разогреве материала самого ВВ в окрестности центра схлопнувшегося пузырька из-за остановки движения. В отличие от ЖВВ вопрос о существовании рассеянных в материале микрополостей указанного размера для твердых ВВ не возникает, поскольку при нормальных условиях это имеет место вообще для всех твердых тел и, в частности, для полимеров [6].

Эффект «залечивания» разрывов сплошности энергией импульса сжимающих напряжений ранее рассматривался применительно к метал-

лам [7]. Он является дополнительным к обычному в механике рассмотрению процесса разрушения как процесса преобразования энергии поля напряжений, возникающего при деформации тела, в поверхностную энергию распространяющихся трещин. В этой связи важнейшей характеристикой материала является величина его удельной поверхностной энергии  $\gamma$ , т. е. свободной энергии единицы площади, которая показывает затрату энергии при образовании единицы новой свободной поверхности [6]. Эту же константу можно применить для получения хотя бы грубой количественной оценки величины локального разогрева при захлопывании микропустот.

Схематизируя реальную ситуацию, будем рассматривать сферический пузырек с начальным радиусом  $R$ , содержащийся в материале. При его сокращении под действием сжимающего импульса, например при ударно-волновом инициировании, поле напряжений производит работу деформирования, соответствующую изменению объема пузырька. Расчет температуры при адиабатическом разогреве материала, заполнившего исчезнувший пузырек, представляет собой, вообще говоря, задачу связанной термопластичности [8]. Можно дать элементарную оценку величины локального разогрева, если положить, что мерой энергии, рассеявшейся в материале, заполнившем объем первоначального пузырька, служит поверхностная энергия  $\gamma \cdot S$  его исходной поверхности. Тогда искомое повышение температуры найдем из выражения

$$\Delta t = \gamma S / c \rho V \quad \text{или} \quad \Delta t = 3\gamma / \rho c R, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельная поверхностная энергия;  $c$  — удельная теплоемкость материала ВВ;  $\rho$  — его плотность;  $R$  — начальный характерный радиус каверны.

Оценим по (1) локальный разогрев материала, подобного гексогену ( $\rho = 1,8$  г/см<sup>3</sup>,  $c = 0,3$  кал/(г·град)), положив в соответствии с известными данными  $R \approx 10^{-4}$  см. Поскольку отсутствуют показатели поверхностной энергии взрывчатых веществ, воспользуемся усредненной экспериментальной оценкой  $\gamma$  для некоторых типичных полимеров [6]. Будем считать, что  $\gamma \approx 5 \cdot 10^5$  эрг/см<sup>2</sup>. Подставляя данные, получаем  $\Delta t \approx 650^\circ$ . Эта оценка дает основание для гипотезы об инициировании вторичных ВВ при воздействии относительно слабых ударных импульсов вследствие перераспределения кинетической энергии массового движения вещества, концентрирующейся в окрестности схлопывающихся микрокаверн, что приводит к требуемому разогреву материала, локализованному в рассеянных центрах.

Полученную выше с помощью константы поверхностной энергии оценку разогрева можно подтвердить и другим путем. Для этого воспользуемся теорией Рэля схлопывания пузырька, взвешенного в жидкости, под действием давления [9]. Кинетическая энергия жидкости  $W$  равна убыли потенциальной энергии при сжатии пузырька и к моменту схлопывания концентрируется в центре исчезающе малого объема, стремясь к величине

$$W = 4/3 \cdot \pi \rho R^3. \quad (2)$$

Пренебрегая вторичными волновыми процессами, положим, что эта энергия пошла на разогрев материала в объеме схлопнувшегося пузырька. Используя приведенные ранее значения размеров пузырька, величины давления и удельной теплоемкости гексогена, с помощью (2) получаем оценку  $\Delta t \approx 700^\circ$ , что сходится с оценкой при помощи поверхностной энергии  $\gamma$  и подтверждает возможность ее применения.

Результаты этих простых расчетов позволяют сделать вывод, что удельная поверхностная энергия  $\gamma$ , являющаяся в некотором приближении характеристической константой ВВ, может рассматриваться как

мера разогрева локальных микроочагов («горячих точек») при инициировании ВВ ударным импульсом. Форма микрокаверн при этом не должна обязательно быть сферической; радиус  $R$  представляет собой некоторый характеристический размер. Наиболее естественно исходные внутренние микрополости твердого ВВ отождествить с микротрещинами Гриффитса [6]. Переход от гомогенного ВВ к гетерогенному означает в таком случае увеличение площади свободных поверхностей, содержащихся в единице объема материала. Если это достигается путем механического измельчения частиц, то в результате происходит увеличение плотности распределения микродефектов, т. е. потенциальных центров разогрева. Этим, очевидно, объясняется повышенная чувствительность ВВ в порошкообразном состоянии.

Рассматриваемая таким образом (т. е. как мера разогрева) величина  $\gamma$  должна находиться в положительной корреляции с чувствительностью различных ВВ к ударным или, точнее, к слабым ударно-волновым воздействиям. Это предположение можно было бы проверить, если бы имелись экспериментально полученные значения  $\gamma$  для индивидуальных ВВ. При отсутствии таковых можно воспользоваться классической формулой Орована [4] для приближенной оценки поверхностной энергии

$$\gamma = 0,1 E a, \quad (3)$$

где  $E$  — модуль упругости материала;  $a$  — межатомное расстояние. Хотя эта формула дает лишь грубое приближение, но ее достоинство заключается в независимости от физической природы сил сцепления. В случае неметаллических материалов в качестве  $a$  следует взять усредненную величину дальности действия молекулярных сил, которую приблизительно можно положить пропорциональной линейному размеру молекулы.

Таким образом, отвлекаясь от числовых констант и имея в виду выражение модуля упругости через плотность вещества и скорость звука в нем, рассматриваемую характеристику  $MeS(=\gamma)$  можно записать в виде

$$MeS = c^2 \rho^{2/3} M^{1/3}, \quad (4)$$

где  $M$  и  $\rho$  — молекулярная масса и плотность кристалла ВВ;  $c$  — скорость звука в нем. Значения величины  $MeS$ , вычисленные для некоторых широко известных индивидуальных ВВ, представлены в таблице; использованные значения скорости звука взяты из работы [10].

Как видно из таблицы, порядок расположения рассмотренных ВВ, отвечающий изменению величины  $MeS$ , приблизительно соответствует их чувствительности к ударным воздействиям, например, при стандартных условиях испытаний на копре. Это можно рассматривать как косвенный аргумент в пользу предлагаемого механизма инициирования ВВ. Кроме того, формула (4) может быть использована при грубой оценке относительной чувствительности ВВ к слабым ударно-волновым и ударным воздействиям.

При этом следует иметь в виду, что объемный разогрев ВВ под действием инициирующего импульса определяется не только температурным режимом отдельной «горячей точки», но и статистикой распределения дефектов в материале, так же как и физическими свойствами

ВВ	$M$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$c$ , км/с	$MeS$	ВВ	$M$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$c$ , км/с	$MeS$
Нитроклетчатка	1188	1,66	2,10	66,0	Тетрил	287	1,73	2,19	46,0
Гексоген	222	1,80	2,62	60,1	Тротил	227	1,64	2,08	36,6
Тэн	316	1,77	2,42	59,0	Амм. селитра	80,1	1,73	2,20	29,6

самого материала ВВ. Это означает, что при прочих равных условиях следует ожидать более быстрого объемного разогрева у ВВ, обладающего более высокой плотностью распределения микродефектов, что соответствует более низкому пределу прочности. Таким образом, можно объяснить некоторое несоответствие между значениями  $Mes$  у тепа и гексогена и их относительной чувствительностью к удару: причина, по-видимому, заключается в том, что гексоген обладает пределом прочности, в полтора раза превосходящим соответствующую величину для тепа [11].

В заключение авторы выражают благодарность А. Н. Дремину за ценные указания, сделанные им в связи с содержанием настоящей работы.

*Поступила в редакцию  
25/VI.1980*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
2. В. С. Соловьев.— В сб.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1977.
3. Л. В. Дубнов, В. А. Сухих, И. И. Томашевич.— В сб.: Взрывное дело, № 71/28, М.: Недра, 1972.
4. Б. Л. Авербах.— В кн. Разрушение. Т. 1. М.: Мир, 1973.
5. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Чувствительность жидких взрывных систем к удару. М.: Наука, 1978.
6. Дж. Берри.— В кн.: Разрушение. Т. 7, ч. II. М.: Мир, 1976.
7. Р. П. Дидык, Е. А. Семенюк и др. ФГВ, 1980, 16, 1.
8. Б. Ранецкий, А. Савчук.— В сб.: Проблемы теории пластичности и ползучести. М.: Мир, 1979.
9. Г. Ламб. Гидродинамика. М.—Л.: ОГИЗ, 1947.
10. Ф. А. Баум и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
11. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.