

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 662.217

**К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ЛОКАЛЬНЫХ МИКРООЧАГОВ
РАЗЛОЖЕНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Л. В. Дубнов, В. А. Сухих, И. И. Томашевич
(Москва)

Одна из первых конструктивных гипотез о природе чувствительности конденсированных ВВ к механическим воздействиям была сформулирована в работе [1]. Существенная роль в ней отводилась адиабатическому сжатию газовых включений, что позволило удовлетворительно объяснять некоторые экспериментальные результаты, особенно для случая нагружения ударом жидких ВВ. Однако рядом дальнейших исследований универсальная роль адиабатического разогрева газа, заключенного в порах или полостях, оспаривалась.

Так, в исследованиях Н. А. Холево [2] была непосредственно установлена связь пластической деформации вещества с его чувствительностью. В исследованиях [3] было показано, что возникновение локальных очагов определения и всплеск при деформации твердых поликристаллических ВВ происходит в плоскостях скольжения, и отмечалось, что по своим физико-химическим свойствам большинство ВВ ведет себя подобно хрупким поликристаллическим телам.

В работе [4] гипотеза Боудена была подвергнута сомнению на том основании, что адиабатический разогрев небольших газовых включений (размером 10^{-3} — 10^{-4} см), ввиду относительно развитой поверхности и высокого теплоотвода в масштабах времени сжатия вообще невозможен. Скорее, сжатие газового пузырька должно происходить почти изотермически. Как отмечается в работе [5], значительно интенсифицировать локальное разложение жидкого ВВ оказывается возможным при кавитации ввиду наличия гораздо более крупных газовых включений.

В работах ИХФ АН СССР [6] развивается мысль, что за возникновение очагов разогрева в твердых ВВ при ударе ответственна неупругая деформация образца (шашки) ВВ как целого, при которой «горячие точки» должны возникать на плоскости сдвига, а не в результате микроразогревов в объеме за счет адиабатического сжатия пузырьков и на других неоднородностях.

Определенная противоречивость перечисленных и других известных исследований в области чувствительности ВВ свидетельствует о сложной природе процесса возникновения взрыва при механическом воздействии, конкретный механизм которого может меняться в зависимости от структурных особенностей вещества, характера нагрузки и условий деформирования вещества под нагрузкой.

Вместе с тем, по мнению авторов, большинство существующих гипотез в недостаточной мере или односторонне учитывает роль структурных неоднородностей в конденсированных ВВ как фактора, способствующего локальным разогревам, например, в результате «высвобождения» энергии при деформации вещества.

В твердых поликристаллических веществах такими структурными дефектами могут быть дислокации в кристаллах, в жидких веществах — полости и газовые включения, существование которых обусловлено поверхностным натяжением.

При частичном или полном устранении какого-либо несовершенства в ходе быстрого механического воздействия «высвобождение» энергии проявляется в резком увеличении кинетической энергии атомов и молекул в окрестности дефекта.

Возникновение несовершенств жидкой структуры (газовых включений и полостей) может быть следствием наличия растворенных газов или турбулизации течения к каким-то механическим воздействиям (ударом, вводом бойка и т. д.). Последняя возможна при достаточно больших числах Рейнольдса [7] и должна быть достижима в типовых жидких ВВ при массовых скоростях $\sim 10^2$ см/сек.

При сжатии полости свободная энергия слоя, ограничивающего полость, должна уменьшаться ввиду сокращения поверхности [8], а кинетическая энергия молекул, остающихся на свободной поверхности, увеличиваться.

Сокращение поверхности ΔS при сжатии сферической полости с радиуса R до радиуса $R - r_0$ ($r_0 \ll R$) есть $\Delta S \approx 8\pi R r_0$. Если r_0 — ребро куба, объем которого приходится на одну молекулу, то энергия молекул со свободной поверхности должна увеличиваться на $\Delta E = 8\pi r_0 R \alpha$, где α — коэффициент поверхностного натяжения.

Поскольку количество молекул на сферической поверхности радиуса R равно $4\pi \frac{R^2}{r_0^2}$, энергия каждой молекулы должна увеличиваться на

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta E}{2} \frac{r_0^2}{4\pi R^2} = \frac{\alpha r_0^3}{R} \dots \quad (1)$$

Цифра 2 в знаменателе дроби выражения (1) означает, что в распределении энергии вследствие близкого действия межмолекулярных сил может участвовать еще один соседний слой молекулы. При сокращении радиуса поверхности на величину dR энергия молекулы, находящейся все время на свободной поверхности, очевидно, увеличится в

$\frac{R d}{r_0}$ раз, т. е. на величину $d\varepsilon = \alpha \frac{r_0^2}{R} dR$. Тогда полное увеличение энергии (ε) молекулы, пребывающей на поверхности в течение всего процесса сокращения полости от радиуса R_1 до радиуса R_2 ($R_2 < R_1$), будет определяться выражением

$$\varepsilon = \int_{R_2}^{R_1} d\varepsilon = \alpha r_0^2 \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

Так, при ударе по нитроглицерину при начальном давлении $p_0 = 1$ атм со скоростью $u = 10^2$ см/сек в нем должно развиваться давление $p \approx \rho_0 c_0 u \sim 30$ атм (c_0 — скорость звука в нитроглицерине). При изотермическом сжатии газового пузырька до давления ~ 30 атм отношение $R_1/R_2 \approx 3$. Поскольку молекулярный вес нитроглицерина $\mu = 227$ г, а плотность $\rho_0 = 1,59$ г/см³, то число частиц в 1 см³ $6 \cdot 10^{23} \approx 4,15 \cdot 10^{21}$ см⁻³, так что с одной частицей должен быть связан куб объемом $0,24 \cdot 10^{-21}$ см³, поэтому $r_0 = 6 \cdot 10^{-8}$ см. Полагая $\alpha = 20$ эрг/см², получим из формулы (2) для данного случая $\varepsilon \approx 20$ эрг/см² $\times 36 \cdot 10^{-16}$ см² $\sim 7 \cdot 10^{-14}$ эрг, что эквивалентно локальному кинетическому разогреву на 400—500° С.

При таких разогревах поверхностный слой начинает разрушаться. Жидкость у стенок пузырька «вскипает», и молекулы с поверхности его, преодолевая притяжение остальных молекул, врываются в полость. В последней всегда могут найтись высокоскоростные молекулы, принадлежащие «хвосту» максвелловского распределения, способные активировать разложение многих молекул.

Таким образом, тепловой взрыв в полости может начаться с образованием газовой фазы, что соответствует общепринятым представлениям.

Описанный механизм не противоречит известным наблюдениям о некотором (не очень сильном) влиянии на чувствительность жидких ВВ химической природы газовых включений. Влияние природы включений может быть объяснено и их поверхностно активными свойствами, сказывающимися на величине поверхностного натяжения жидкости в полости [9].

Подобие выкладки можно провести и для твердых поликристаллических тел, в которых носителями свободной энергии являются дислокации, линейные дефекты кристаллической решетки. Отметим, что всякая деформация кристалла связана с движением и в целом с ростом количества дислокаций. Однако при этом в развивающихся плоскостях скольжения, в областях интенсивного сдвига отдельные пары дислокаций с антипараллельными векторами Бюргера способны аннигилировать с восстановлением совершенной структуры и выделением энергии порядка энергии дислокации [10]. Исходя из оценок [11] в расчете на одно межатомное расстояние энергия дислокации

$$\varepsilon \sim G b^2 a, \quad (3)$$

где G — модуль сдвига; b — величина вектора Бюргера дислокации; a — межатомное расстояние. При $G = 10^3$ кг/см², $b = 10 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ см), типовом значении для органических кристаллов, например тринитротолуола, и $a = 1,5 \text{ \AA}$ из соотношения (3) следует, что $\varepsilon \approx 1,5 \cdot 10^{-12}$ эрг ~ 1 эв.

Вследствие близкого действия атомных сил в кристалле зона выделения энергии должна ограничиваться радиусом порядка межатомного расстояния и заключать при

плотно упакованной структуре не более 8—12 атомов, т. е. в среднем на каждый атом в зоне аннигиляции будет приходиться энергия $\sim 0,1 \text{ эв}$, что соответствует интенсивности локального разогрева $\sim 10^3 \text{ К}^\circ$. Иными словами, достигается температура, соответствующая началу химической реакции во фронте нормальной детонационной волны [12]. Указанному значению температуры вполне соответствует минимальное критическое значение очага разогрева $\sim 10^{-7} \text{ см}$. Как следует из работы [13], увеличение температуры очага в типовом взрывчатом материале (например, тринитротолуоле) с 800 до 1100°К ведет к уменьшению его критического размера ($\sim 10^{-4} \text{ см}$), по крайней мере на два порядка.

При полной аннигиляции двух дислокаций должно возбуждаться 10^4 — 10^5 атомов, что при учете плотности дислокаций, составляющей, по-видимому, величину 10^4 — 10^5 см^{-2} , дает некоторое представление о возможных масштабах зарождения локальных вспышек.

С позиций дислокационных структур можно дать объяснение целому ряду наблюдаемых явлений.

Так, поскольку бездислокационный кристалл прочнее, его деформация должна протекать при значительно больших нагрузках, а образцы, изготовленные из таких кристаллов, должны обладать пониженной чувствительностью к механическим воздействиям. С другой стороны, деформация кристалла может быть затруднена, а чувствительность соответственно понижена (путем соответствующей термомеханической обработки) и при использовании кристаллов с уплотненной дислокационной сеткой (своеобразный наклеп). К такому же результату можно прийти, следуя по пути создания образцов с мелкокристаллической структурой и развитыми межзеренными границами, препятствующими передвижению дислокаций. Препятствия для дислокаций могут создавать и атомы поверхностно активных веществ [9].

Аналогичным образом можно объяснить роль мягкой или жесткой инертной примеси (флегматизатора и сенсibilизатора), повышение чувствительности к удару, сопряженное с наличием пор или раковин в прессованных или литых составах и т. д.

Таким образом, оказывается возможным сформулировать следующую гипотезу.

В конденсированных ВВ ответственными за возникновение локальных очагов разогрева и вспышек при механических воздействиях могут быть структурные несовершенства, носители значительной свободной энергии: в твердых поликристаллических ВВ — дислокации, в жидких ВВ — поверхности полостей и газовых включений. Полное или частичное устранение какого-либо дефекта при механическом воздействии (аннигиляция пары дислокаций в твердом или сокращение поверхности полости в жидком ВВ) связано с возникновением локального очага разогрева, достаточные размеры или совокупность которых могут привести к самораспространяющейся реакции взрывчатого превращения.

Поступила в редакцию
27/X 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.
2. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
3. В. А. Сухих, Ю. Б. Харитон. Сб. «Вопросы теории взрывчатых веществ». ИХФ АН СССР. М.—Л., 1947.
4. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 126, 2.
5. В. Е. Гордеев. Канд. дисс. ИХФ АН СССР, 1967.
6. Г. Т. Афанасьев, В. К. Бобылев и др. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, 1967.
7. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1963.
8. М. А. Леонтович. Введение в термодинамику. М.—Л., ГИТТЛ, 1952.
9. Ю. В. Горюнов, Н. В. Перцев, Б. Д. Сумм. Эффект Ребиндера. М., «Наука», 1966.
10. Хобстеттер. Полупроводники. Гл. XII, ИЛ, 1962.
11. А. Х. Коттрелл. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М., Металлургиздат, 1958.
12. А. Ф. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., ГИФМЛ, 1959.
13. А. Г. Мержанов, В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 148, 2, 1963.