

УДК 662.215.5+539.3

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

А. П. АМОСОВ, С. А. БОСТАНДЖИАН, Ж. А. ЗИНЕНКО

РАЗОГРЕВ И ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СДВИГОВОМ РАЗРУШЕНИИ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 17 X 1972)

Г. Т. Афанасьевым и В. К. Боболевым ⁽¹⁾ был предложен механизм образования очагов возбуждения взрыва твердых в.в. при механических воздействиях. Согласно этому механизму, образование очагов разогрева при прочностном разрушении происходит в результате самопроизвольной упругой разгрузки деформированных частей.

Для определения условий, при которых образование очагов возбуждения взрыва происходит по этому механизму, рассмотрим задачу о разогреве и воспламенении твердых в.в. при сдвиговом разрушении.

В соответствии с ⁽¹⁾ удельную силу трения считаем равной пределу прочности в.в. на сдвиг. Ограничимся случаями, когда в результате разогрева от сил трения температура не поднимается выше температуры плавления в.в., т. е. рассмотрим разогревы при сухом трении. Фазовыми превращениями и выгоранием в.в. при воспламенении образующихся очагов разогрева пренебрегаем.

Пусть бесконечный плоский слой в.в. толщиной $2h$ (рис. 1) подвергнут деформации простого сдвига. При достижении предела прочности в.в. на сдвиг в каком-то

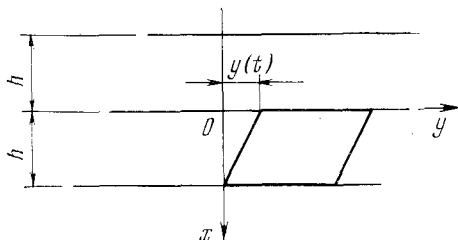


Рис. 1. Схема деформации плоского слоя ВВ при сдвиговом разрушении

месте образуется плоскость разрушения. Предполагаем, что она проходит посередине слоя. Это делает задачу симметричной и позволяет рассмотреть поведение только одной половины, например нижней. Выделим в нижней половине слоя элемент с единичной поверхностью трения (рис. 1). Так как рассматривается процесс упругой разгрузки, считаем элемент линейно-упругим телом. Отклонение элемента от положения равновесия в момент времени t определим координатой $y(t)$ верхнего левого угла. В положении равновесия $y=0$ предельное отклонение в момент разрушения, принимаемый за начало отсчета времени, обозначим через y_0 . Будем считать, что в начальный момент скорость верхней грани элемента равна v_0 и направлена в сторону положения равновесия.

Как показано в работе ⁽¹⁾, процесс разрушения твердых в.в. хорошо описывается закономерностями, полученными для пластических металлов. Для последних предел прочности уменьшается примерно линейно с повышением температуры ⁽²⁾. Поэтому зависимость предела прочности в.в. на сдвиг от температуры возьмем в виде $\tau_{\text{пр}}(T) = \tau_{\text{пр}}^0 (T_{\text{пл}} - T) / (T_{\text{пл}} - T_0)$, где $\tau_{\text{пр}}^0$ — предел прочности в.в. на сдвиг при начальной температуре T_0 , $T_{\text{пл}}$ — температура плавления в.в.

Систему дифференциальных уравнений движения элемента и теплового баланса в безразмерной форме можно записать так

$$d^2\eta/d\tau^2 + \eta - [\vartheta_m + (1 + \vartheta_m)\theta(0, \tau) / \theta_0] \text{sign } d\eta/d\tau = 0, \quad (1)$$

$$\partial\theta/\partial\tau = \partial^2\theta/\partial\xi^2 + \kappa \exp \theta / (1 + \beta\theta). \quad (2)$$

Начальные и граничные условия:

$$\eta = 1, d\eta/d\tau = -\chi; \theta = -\theta_0 \quad \text{при } \tau = 0; \quad (3)$$

$$-\partial\theta(0, \tau) / \partial\xi = |\nu[\theta(0, \tau) + \theta_0\vartheta_m / (1 + \vartheta_m)] d\eta/d\tau| \quad \text{при } \theta < \quad (4)$$

$$< -\theta_0\vartheta_m / (1 + \vartheta_m),$$

$$\partial\theta(0, \tau) / \partial\xi = 0 \quad \text{при } \theta \geq -\theta_0\vartheta_m / (1 + \vartheta_m), \quad (5)$$

$$\theta \rightarrow -\theta_0 \quad \text{при } \xi \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Безразмерные переменные и параметры: $\eta = y / y_0$,

$$\xi = x \sqrt{c\rho/\kappa t_m}, \tau = t/t_m, \theta = (T - T_m) E / RT_m^2, (t_m = \sqrt{\rho h y_0 / 3\tau_{\text{пл}}^0}),$$

$$\chi = v_0 t_m / y_0, \nu = \tau_{\text{пр}}^0 y_0 / (T_{\text{пл}} - T_0) \sqrt{\lambda c \rho t_m}, \theta_0 = (T_m - T_0) E / RT_m^2,$$

$$\beta = RT_m / E, \vartheta_m = (T_m - T_{\text{пл}}) / (T_{\text{пл}} - T_0), \kappa = Q k_0 t_m E / RT_m^2 c \rho \exp E / RT_m.$$

Обозначения: T_m — максимальная температура в плоскости трения в случае разогрева инертного тела; ρ — плотность в. в., λ , c — коэффициенты теплопроводности и теплоемкости в. в.; Q , k_0 , E — тепловой эффект, предэкспонент и энергия активации химической реакции термического разложения в. в.; R — универсальная газовая постоянная.

Уравнение (1) — уравнение затухающих колебаний элемента, поэтому при переходе к безразмерным переменным за масштаб времени было выбрано характерное время колебаний элемента t_m . Масштабом для координаты x является характерная ширина зоны прогрева $x_m = \sqrt{\lambda t_m / c\rho}$ за время t_m . Параметр χ характеризует отношение начальной скорости v_0 к характерной скорости свободных колебаний $v_m = y_0 / t_m$. Параметр ν определяет интенсивность тепловыделения от сил трения, параметр κ — интенсивность тепловыделения от химической реакции. Параметры β и θ_0 имеют обычный для теории теплового воспламенения смысл^(3, 4). Выражения (4) и (5) представляют собой граничное условие на плоскости трения соответственно до и после достижения температуры плавления на ней. Условие (6) написано в предположении малости размера зоны разогрева по сравнению с толщиной слоя в. в.

Система (1) — (5) решалась на ЭВМ для первого колебания. Находилось положение элемента, скорость его движения, распределение температур в зависимости от времени и параметров системы. Больше одного колебания на данной модели рассматривать нельзя, так как при напряжениях порядка предела прочности вещества на сдвиг тело можно рассматривать как линейно-упругое только при упругой разгрузке. При нагружении необходимо учитывать еще пластическую деформацию.

Сначала рассмотрим случай упругой разгрузки инертного тела ($\kappa = 0$). Здесь в качестве безразмерной температуры удобно принять величину $\vartheta = (T - T_{\text{пл}}) / (T_{\text{пл}} - T_0)$. Тогда в выражениях (1) — (6) следует положить $\theta_0 = 1$, $\vartheta_m = 0$ и заменить $\theta(\xi, \tau)$ на $\vartheta(\xi, \tau)$.

Из приведенных на рис. 2 кривых следует, что существует критическое значение параметра ν ($\lg \nu_{\text{кр}} = 0,24$, $\nu_{\text{кр}} = 1,74$), разделяющее два типа зависимости максимального разогрева от параметра χ , соответствующие двум различным режимам упругой разгрузки твердого тела при сдвиговом разрушении. При $\nu > \nu_{\text{кр}}$ с уменьшением χ максимальное значение разогрева уменьшается и при $\chi \rightarrow 0$ ($v_0 \rightarrow 0$) асимптотически стремится к некоторому предельному значению ϑ_m (предельный максимальный разогрев). Слабая зависимость максимального разогрева от χ при малых значениях объясняется тем, что разогрев в этом случае достигается существенно за счет самопроизвольной упругой разгрузки в. в., и величина разогрева оп

ределяется величиной запасенной упругой энергии перед разрушением, а вклад начальной кинетической энергии в работу сил трения несуществен. При уменьшении ν режим самопроизвольной упругой разгрузки становится все более затрудненным вследствие уменьшения максимального разогрева, влияющего в свою очередь на величину силы трения.

При $\nu \leq \nu_{кр}$ величина максимального разогрева θ_m существенным образом зависит от значения параметра χ и стремится к нулю при $\chi \rightarrow 0$. Определяющую роль здесь играет запас кинетической энергии от начального толчка. Режим самопроизвольной упругой разгрузки сменяется режимом принудительной упругой разгрузки.

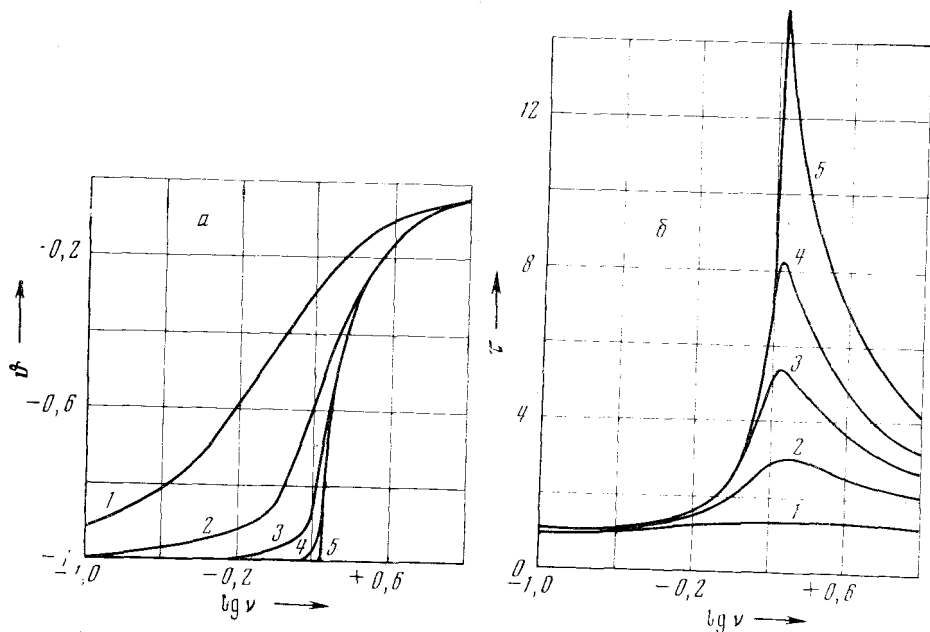


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры (а) и времени достижения максимальной температуры (б) в плоскости трения от величины $\lg \nu$. 1 — $\chi = 1$, 2 — 10^{-1} , 3 — 10^{-2} , 4 — 10^{-3} , 5 — 10^{-5}

Таким образом, возникновение очагов разогрева за счет самопроизвольной упругой разгрузки твердых в.в. при разрушении возможно при выполнении условия $\nu > \nu_{кр} = 1,74$.

Зависимости предельного максимального разогрева в плоскости трения θ_m , скорости движения элемента и положения его в момент достижения θ_m от параметра ν в интервале $1,74 \leq \nu \leq 10$ можно аппроксимировать выражениями $\theta_m = 0,04 - 0,336 (\nu - 1,58)^{-0,617}$, $d\eta/dt = -1,55 + 1,22 (\nu - 1,37)^{-0,244}$, $\eta = -0,69 + 0,79 (\nu - 1,64)^{-0,331}$.

Время достижения максимальной температуры зависит также и от параметра χ (рис. 2). Для $\nu \geq 2$ и $\chi \geq 10^{-5}$ оно одного порядка с характерным временем свободных колебаний t_m или на порядок больше его.

Оценки, проведенные для типичного представителя бризантных в.в. — гексогена ($\tau_{кр}^0 = 4,6 \cdot 10^7$ н/м², $\rho = 1500$ кг/м³, $c = 1000$ Дж/кг·град, $\lambda = 0,167$ Дж/м·сек·град^(1,5)) в предположении $y_0 = 0,1 h$ ⁽¹⁾, дают следующие зависимости характерных величин от толщины слоя и температуры плавления в.в.: $t_m = 10^{-3} h$ сек., $x_m = 10^{-5} \sqrt{h}$ м, $v_m = 100$ м/сек, $\nu = 300\,000 \sqrt{h} / (T_{пл} - T_0)$. Для размера $h = 10^{-4}$ м, характерного для копро-вых испытаний, и величин температур плавления 500 и 900° К параметр ν принимает значения, равные соответственно 15 и 5. Таким образом, при копро-вых испытаниях гексогена возможно получение температур разогре-

ва, близких к температуре плавления ($\theta = 0$), по механизму Афанасьева — Боболева. При этом время достижения максимальной температуры при упругой разгрузке при разрушении составляет $10^{-7} - 10^{-6}$ сек., размер зоны прогрева $10^{-6} - 10^{-7}$ м, максимальные скорости трения $10 - 100$ м/сек. Аналогичные результаты получаются и для других типичных в.в.

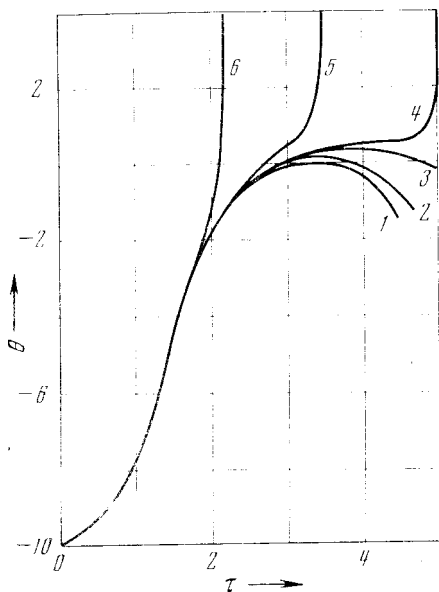


Рис. 3. Изменение во времени температуры в плоскости трения при различных величинах χ : 1 — $\chi = 0$; 2 — 3; 3 — 5,5; 4 — 5,6; 5 — 10; 6 — 100 ($\nu = 5$, $\chi = 0,04$, $\theta_0 = 10$, $\beta = 0,04$)

Из формулы (7) следует, что в среднем $\chi_{кр} \approx 10$. Эта величина может применяться для грубых оценок. Она совпадает со средней величиной критического значения параметра Франк-Каменецкого δ для плоского очага задачи об очаговом тепловом взрыве (⁴). Если принять в качестве радиуса очага характерную ширину зоны прогрева x_m , то выражение для δ становится идентичным с выражением χ .

Нетрудно показать, что χ представляет отношение времени t_m к $t_{ад}$ — адиабатическому периоду индукции воспламенения при максимальной температуре T_m . Так как в среднем $\chi_{кр} \approx 10$, то $t_{ад} \leq 0,1 t_m$.

Проводя оценку для случая воспламенения гексогена в копровых испытаниях, получим $t_{ад} \leq 10^{-7}$ сек. Отсюда вытекает, что в условиях испытаний должны достигаться максимальные температуры $T_m \geq 740^\circ \text{K}$ (при расчетах использовались следующие значения параметров Q , E , k_0 , взятые из работ (^{5, 6}): $Q = 8,7 \cdot 10^9$ дж/м³, $E = 1,98 \cdot 10^5$ дж/моль, $k_0 = 10^{13,5}$ сек⁻¹).

Авторы благодарны А. Г. Мержанову и Г. Т. Афанасьеву за ценные советы и полезное обсуждение работы.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Черноголовка Моск. обл.

Поступило
11 X 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом, М., 1968.
- ² Д. Мак Лин, Механические свойства металлов, М., 1965.
- ³ В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 3 (1964).
- ⁴ А. Г. Merzhanov, Comb. and Flame, 10, № 4 (1966).
- ⁵ К. К. Андреев, Термическое разложение и горение взрывчатых веществ, М., 1966.
- ⁶ Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер, Физика взрыва, М., 1959.