

О МЕХАНИЗМЕ РАЗОГРЕВА И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВВ ЗА СЧЕТ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, В. С. Козлов,
С. М. Муратов

Основной фактор, ответственный за инициирование твердых ВВ при механических воздействиях,— тепловыделение внешнего трения [1, 2]. В настоящей работе на основе результатов [3—6] рассматриваются теоретические модели, применявшиеся для исследований механизма внешнего трения и новые. Рассматривается в основном вопрос о роли упругой разгрузки в образовании очагов разогрева в процессе внешнего трения. Впервые в работе [1] предложен механизм инициирования ВВ при ударе, согласно которому очаги разогрева и воспламенения образуются за счет перехода запасенной перед разрушением упругой энергии образца ВВ в теплоту внешнего трения на поверхностях разрушения ВВ под действием удара. В [7] авторы обращают внимание также на упругую энергию, запасенную в пуансонах копра при копровых испытаниях ВВ.

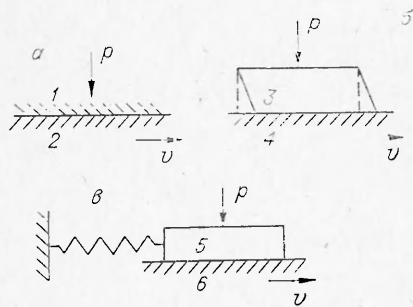
В работах [3—6] рассматривалось только сухое внешнее трение (внешнее трение можно считать сухим до температуры на поверхности трения $0,9T_{пл}$, примерно при которой в окрестности плоскости трения образуется пластическая прослойка ВВ [1, 3]). Учитывалась очень важная для процесса упругой разгрузки зависимость силы трения от температуры, которую, например, для бризантных ВВ можно записать следующим образом [3]:

$$\tau_{тр}(T) = \tau_{тр}^0 \frac{T_{пл} - T}{T_{пл} - T_0}, \quad (1)$$

где $\tau_{тр}^0$ — удельная сила трения при начальной температуре T_0 .

Так как на практике чувствительность ВВ к механическим воздействиям исследуется в основном на копрах, то для иллюстрации результатов, полученных на моделях, будем неоднократно обращаться к оценке разогрева и воспламенения ВВ в условиях копровых испытаний. Используемые модели не совсем точно моделируют условия копровых испытаний, но позволяют получить грубые оценки основных параметров процесса. Следуя в основном данным работы [1], самые общие характеристики условий испытаний бризантных ВВ по наиболее распространенным методам можно принять следующими: характерный размер образца ВВ $h = 10^{-4}$ м, характерный размер пуансона (стального ролика) $h_1 = 10^{-2}$ м, среднее значение $\tau_{тр}^0 = 3 \cdot 10^7$ Н/м², время образования очагов разогрева $t \leq 10^{-4}$ с, характерная температура очагов разогрева $T = 800$ К.

Модель 1. Наиболее простая модель механизма внешнего трения получается тогда, когда не учитываются деформационные свойства трущихся тел, т. е. не рассматривается упругая разгрузка. В этом случае отсутствует задача о механическом движении и все определяется тепловой задачей. Так как процесс воспламенения ВВ при механических воздействиях чаще всего кратковременный и вся масса трущихся тел не успевает прогреться, то вполне допустимо считать ВВ и инертное тело полубесконечными пространствами. Такая модель была принята в работе [3], где рассматривалось зажигание твердых ВВ теплотой сухого трения при скольжении с постоянной скоростью v полупространства инертного материала по полупространству ВВ (см. рисунок).



Модели механизма внешнего трения.
 а) модель 1: 1 — ВВ, 2 — инертное тело;
 б) модель 2: 3 — линейно-упругое тело, 4 — недеформируемое полупространство; в) модель 3: 5 — недеформируемое инертное тело, 6 — недеформируемое полупространство ВВ.

коэффициента распределения потоков имеем $\alpha_{т.п} = (1 + \sqrt{\lambda_1 c_{101} / \lambda c \rho})^{-1} = 0,037$. В этом случае при температуре воспламенения $T_3 = 0,9 T_{пл} = 800$ К получим следующие значения необходимых скоростей скольжения v в зависимости от времени задержки воспламенения t_3 :

$$v = 100; 310 \text{ и } 980 \text{ м/с}$$

$$\text{при } t_3 = 10^{-4}, 10^{-5} \text{ и } 10^{-6} \text{ с} \quad (2)$$

соответственно. Для $t_3 = 10^{-5}$ с и $T_3 = 0,9 T_{пл}$ скорость скольжения равна 240 м/с при $T_3 = 700$ К и 400 м/с при $T_3 = 900$ К.

Таким образом, в условиях копровых испытаний для воспламенения ВВ за счет сухого трения на границе ВВ — стальной ролик скорость взаимного скольжения должна достигать сотен метров в секунду.

Если поверхность трения проходит внутри образца ВВ ($\alpha_{т.п} = 0,5$), то необходимая для воспламенения скорость трения становится более чем на порядок меньше. Например, при $T_3 = 0,9$ и $T_{пл} = 800$ К:

$$v = 6; 23; 73 \text{ м/с}$$

$$\text{при } t_3 = 10^{-4}; 10^{-5}; 10^{-6} \text{ с} \quad (3)$$

соответственно.

Модель 2. Приведенные выше результаты относятся к внешнему трению недеформируемых твердых тел. Если принять во внимание способность твердых тел упруго деформироваться при трении, то в определенных условиях трение может сопровождаться возникновением механических релаксационных колебаний трущихся тел [8]. В этом случае трение будет происходить не с постоянной скоростью относительного скольжения тел на плоскости трения, а состоять из последовательного чередования двух различных этапов: относительного покоя трущихся тел на плоскости трения и скачка — неравномерного относительного их перемещения. На первом этапе нет проскальзывания тел, и происходит накопление упругой энергии, во время второго происходит скольжение и упругая разгрузка тел. Скорость скольжения при скачке может достигать значительных величин и намного превышать среднюю скорость трения, поэтому во время скачков возможно достижение высоких разогревов на плоскости трения. При этом во время скачка происходит переход запасенной упругой энергии в теплоту трения.

Механизм разогрева и воспламенения твердых ВВ за счет внешнего трения при возникновении механических релаксационных колебаний назван в работе [6] релаксационным механизмом.

Даже при учете зависимости $\tau_{тр}(T)$ математическая задача о воспламенении ВВ в этой модели оказывается простой и возможно получить приближенное аналитическое решение [3]. Это решение позволяет, в частности, оценить разогрев и воспламенение бризантных ВВ в условиях копровых испытаний за счет сухого трения ВВ о стальной ролик. В качестве характерных величин коэффициентов теплового насыщения ВВ и стали можно принять соответственно: $\sqrt{\lambda c \rho} = 5 \cdot 10^2$ Дж/(м²·К·с^{1/2}) и $\sqrt{\lambda_1 c_{101}} = 1,3 \cdot 10^4$ Дж/(м²·К·с^{1/2}). Тогда для коэффици-

В работе [5] предложено объяснение, согласно которому причина возникновения релаксационных колебаний при внешнем трении заключается в уменьшении силы трения при повышении температуры на поверхности трения. В этом случае механизм образования разогревов во время скачков при трении аналогичен механизму, предложенному для случая сдвигового разрушения твердых ВВ под действием удара [1].

Релаксационный механизм подробно исследован в работах [4—6] применительно к сдвиговому деформированию бесконечного плоского слоя твердого ВВ толщиной $2h$, когда плоскость трения проходит по середине слоя (см. рисунок, б). Модель 2 значительно сложнее модели 1, так как включает в себя также движение трущегося тела в процессе упругой разгрузки, в результате чего описываемая ее задача состоит из совокупности механической и тепловой задач и решается только при помощи численного счета на ЭВМ. Здесь же существенным становится размер тела, в котором происходит накопление упругой энергии. В работах [4—6] рассматривалось сдвиговое деформирование ВВ, т. е. считалось, что очаг разогрева образуется за счет упругой энергии, запасенной в образце ВВ.

Как было показано в [4—6], образование очагов разогрева по релаксационному механизму возможно при условии $\nu > \nu_{кр} = 1,74$, где

$$\nu = \frac{(\tau_{тр}^0)^2 h}{G(T_{пл} - T_0)} \left[\frac{3G}{(\lambda c \rho h)^2 \rho} \right]^{1/4} \quad (4)$$

— безразмерный критерий, характеризующий отношение времени тепловой релаксации к времени релаксации упругих напряжений, т. е. к характерному времени колебаний (здесь G — модуль сдвига). Максимальная температура очага ($0,9 T_{пл}$) достигается при $\nu \approx 5$. Время образования очага разогрева почти на порядок больше характерного времени колебаний $t_m = h\sqrt{\rho/3G}$. Характерная скорость трения при образовании очага $v_m = y_0/t_m = \tau_{тр}^0 \sqrt{3/\rho G}$, где $y_0 = h\tau_{тр}^0/G$ — отклонение от положения равновесия в момент начала упругой разгрузки. Характерный размер очага разогрева определяется соотношением $x_m = \sqrt{at_m}$. Для воспламенения образующегося очага разогрева необходимо, чтобы $t_{ад} \leq 0,1 t_m$, где $t_{ад}$ — адиабатический период индукции воспламенения ВВ при максимальной температуре очага разогрева.

Оценки, проведенные для гексогена в условиях копровых испытаний ($\rho = 1500$ кг/м³, $c = 1000$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0,167$ Дж/(м·с·К) [8]) в предположении $y_0 = 0,1 h$ [1] дают следующие значения характерных величин: $t_m = 10^{-7}$ с, $x_m = 10^{-7}$ м, $v_m = 1000$ м/с, $\nu = 5$ при $T_{пл} = 900$ К. Оценка по $t_{ад}$ ($Q = 5,81 \cdot 10^6$ Дж/кг, $E = 1,98 \cdot 10^5$ Дж/моль, $lg k_0 = 18,5$ [9]) показывает, что для воспламенения очага разогрева необходимо, чтобы его максимальная температура была не ниже 800 К. Аналогичные результаты получаются и для других типичных бризантных ВВ. Таким образом, при копровых испытаниях твердых ВВ возможно образование и воспламенение очагов разогрева по релаксационному механизму на поверхностях трения, проходящих внутри образца ВВ, за счет упругой энергии, запасенной в образце. Время достижения максимальной температуры при упругой разгрузке достигает порядка 10^{-6} с, размер зоны прогрева $\sim 10^{-7}$ м, максимальная скорость трения 100 м/с близка к полученной скорости при расчете по модели 1, где $v = 73$ м/с при $t_s = 10^{-6}$ с.

Если плоскость трения проходит не внутри образца ВВ, а совпадает с плоскостью контакта ВВ с недеформируемым полупространством инертного тела, то легко показать, что это эквивалентно замене в выражении (4) величины h на $2h$ и умножению правой части выражения (4) на $\alpha_{т.п.}$. Такая замена в приведенной выше оценке для разогрева

гексогена в условиях копровых испытаний дает для плоскости контакта ВВ со стальным роликом $\nu = 0,26 < \nu_{кр}$. Отсюда видно, что релаксационный механизм не может обеспечить воспламенения твердых ВВ в условиях копровых испытаний на границе ВВ — стальной ролик за счет упругой разгрузки образца ВВ. Другими словами, запаса упругой энергии образца ВВ недостаточно для образования очагов разогрева на границе контакта ВВ со стальным роликом.

Рассмотрим, что может дать для образования очагов разогрева на контакте ВВ с инертным телом упругая энергия сдвига, запасенная в инертном теле. Рассмотрим модель 2, приняв, что инертное тело 2 упругое, а полупространство ВВ недеформируемое. Легко показать, что и в этом случае развитие процесса определяется значением критерия ν с $\nu_{кр} = 1,74$, но при этом в выражении для ν вместо некоторых параметров образца ВВ надо использовать параметры инертного тела

$$\nu = (1 - \alpha_{т.п}) \frac{(\tau_{тр}^0)^2 h_1}{G_2 (T_{пл} - T_0)} \left[\frac{3G_1}{(\lambda_1 c_1 \rho_1 h_1)^2 \rho_1} \right]^{1/4} \quad (5)$$

Здесь h_1 — толщина образца инертного материала.

В условиях копровых испытаний модель 2 дает для упругой разгрузки образца из стали ($\rho_1 = 7850$ кг/м³, $G_1 = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м², $h_1 = 10^{-2}$ м) при трении по плоскости контакта ВВ со стальным роликом $t_m = 1,8 \cdot 10^{-6}$ с, $v_m = 2$ м/с, $\nu = 0,01$ при $T_{пл} = 900$ К. Из этого следует, что очаг разогрева на этой плоскости образоваться не может, время упругой разгрузки стальных роликов достигает 10^{-5} с, а скорость движения — 2 м/с. Как следует из расчетов по более простой модели 1, для образования очагов разогрева при таком времени скорость трения должна составлять сотни метров в секунду. При скорости 2 м/с не образуется очаг разогрева, достаточный для воспламенения ВВ.

Давления, необходимые для инициирования бризантных ВВ в условиях копровых испытаний, составляют несколько килобар [1], поэтому можно принять, что упругая разгрузка стальных роликов начинается при касательных напряжениях в них порядка $\tau^0 = 3 \cdot 10^8$ Н/м². Это значение τ^0 выше силы трения скольжения $\tau_{тр}^0$, и в задаче появляется дополнительный параметр $k = \tau_{тр}^0 / \tau^0$ [6]. В рассматриваемом случае $k = 0,1$. Подставив в (5) вместо $\tau_{тр}^0$ величину τ^0 , при $k = 0,1$ получим $\nu = 1$, т. е. и в этом случае очаги разогрева на границе ВВ — стальной ролик образоваться не могут. Здесь $v_m = 20$ м/с, но и эта скорость, как видно из (2), мала для воспламенения. Согласно (3), такая скорость трения достаточна лишь для образования очага разогрева внутри ВВ. Поскольку при $t = 10^{-5}$ с ширина зоны прогрева ВВ $x = \sqrt{at} = 10^{-6}$ м, то, предполагая, что стальной ролик при упругой разгрузке увлекает слой ВВ толщиной в несколько микрон, можно считать, что плоскость трения проходит внутри ВВ. При $k = 0,1$ в этом случае $\nu = 13,5$, что указывает на возможность образования очага разогрева (при вычислении в (5) при $\alpha_{т.п} = 0,5$ вместо $\tau_{тр}^0$ подставлялась величина τ^0 , а вместо $\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}$ — величина $\sqrt{\lambda c \rho}$).

Модель 3. Рассмотрим, как можно оценить образование очагов разогрева по релаксационному механизму за счет упругой энергии не сдвига, а сжатия или растяжения ВВ или инертного тела.

Рассмотрим модель, изображенную на рисунке, в. Здесь энергетическим источником разогрева является упругая энергия сжатия или растяжения инертного тела, запасенная в пружине. В этой модели для упрощения задачи скользящее инертное тело принимается недеформируемым, а упругие свойства его моделируются пружиной. Считаем, что перемещение инертного тела в процессе упругой разгрузки много меньше протяженности инертного тела. Это делает тепловую задачу одно-

мерной. Движение инертного тела в процессе упругой разгрузки так же, как и для модели 2, описывается уравнением колебаний:

$$my'' + gy + |\tau_{\text{тр}}| \operatorname{sign} y' = 0,$$

где y — отклонение тела от положения равновесия; m — масса инертного тела и g — жесткость пружины, отнесенные к единице площади контакта с ВВ. Тепловая задача записывается так же, как и для модели 2. В безразмерном виде математические задачи для моделей 2 и 3 тождественны, т. е. модель 3 сводится к модели 2. Только определяющий безразмерный критерий v будет иметь несколько иной вид:

$$v = (1 - \alpha_{\text{т.п}}) \frac{(\tau_{\text{тр}}^0)^2}{g(T_{\text{п.п}} - T_0)} \left[\frac{g}{(\lambda_{1c} \rho_1)^2 m} \right]^{1/4}. \quad (6)$$

Характерные величины:

$$t_{\text{м}} = \sqrt{m/g}, \quad y_0 = \tau_{\text{тр}}^0/g, \quad v_{\text{м}} = \tau_{\text{тр}}^0 \sqrt{1/gm}.$$

Если применить эти соотношения для оценки возможности образования очагов разогрева за счет упругой разгрузки энергии сжатия стальных роликов в условиях копровых испытаний, то получим результаты, аналогичные результатам для модели 2. Для оценки возможности образования очагов разогрева за счет упругой энергии сжатия ВВ необходимо в выражении (6) вместо характеристик инертного тела подставить характеристики ВВ и заменить $(1 - \alpha_{\text{т.п}})$ на $\alpha_{\text{т.п}}$.

Отделение ИХФ АН СССР,
Черноголовка

Поступила в редакцию
14/Х 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых ВВ ударом. М., «Наука», 1968.
2. Г. А. Афанасьев. Второй Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. (Автореф. докл.). Черногловка, 1969.
3. А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, В. С. Козлов. ФГВ, 1972, 8, 3, 362.
4. А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, Ж. А. Зиненко. Докл. АН СССР, 1973, 209, 6, 1361.
5. А. П. Амосов. Докл. АН СССР, 1973, 212, 3, 569.
6. А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян и др. ФГВ, 1976, 12, 1, 59.
7. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. ФГВ, 1972, 8, 2, 299.
8. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение ВВ. М., «Наука», 1966.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ

В. М. Маслов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов

В литературе описаны режимы безгазового горения с образованием твердого [1—4] и жидкого продукта [5].

В данной работе экспериментально исследуется более общий по агрегатному состоянию продукта случай. Он включает в себя не только отмеченные выше предельные случаи, но и переходную двухфазную область.