

## ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ ИНЕРТНУЮ ПРЕГРАДУ В РЕАЛЬНЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

В. Ф. Проскудин, В. А. Голубев, П. Г. Бережко, И. Е. Бойцов,  
Е. Н. Беляев, В. Н. Фунин, И. К. Кремзуков, А. Я. Малышев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Показано влияние перемещения продуктов горения за фронтом химической реакции в конденсированной системе на прохождение волны горения через инертную преграду. В экспериментах использовали прессованные образцы из смеси  $Ti + C + 20\% TiC$ , содержащие преграду из танталовой ленты толщиной от 10 мкм до 0,6 мм. Получены зависимости времени задержки волны горения при прохождении преграды от толщины последней для двух случаев: при небольшом ( $< 1$  мм) и при более значительном ( $\approx 4,5$  мм) перемещении вещества за фронтом химической реакции.

Располагаемые на пути движения фронта горения инертные преграды находят широкое применение как в исследовательской работе [1–3], так и для решения некоторых прикладных задач [4, 5].

Достаточно подробное расчетно-теоретическое исследование закономерностей прохождения волны горения через инертную преграду проведено в работах [5, 6], однако моделирование процесса осуществлялось без учета возможного перемещения вещества за фронтом химической реакции. В реальных же конденсированных системах горение неизбежно сопровождается большим или меньшим перемещением продуктов горения за фронтом реакции, связанным как с различием кристаллической плотности исходной шихты и продуктов горения, так и с воздействием газовой фазы, выделяющейся в зоне фронта горения.

В качестве примера можно привести реакционную систему  $Ti + C + 20\% TiC$ . Известно, что горение образцов из этой смеси при наличии достаточно толстой поджигающей таблетки с «податливыми» шлаками\* сопровождается перемещением вещества за фронтом горения с образованием области пониженной плотности продуктов горения — волны разгрузки, перемещающейся вместе с этим фронтом [7]. Как

показали дальнейшие исследования, волна разгрузки в указанной системе образуется и при использовании тонкой поджигающей таблетки. В этом случае роль толстой таблетки с «податливыми» шлаками играет уже сама сгоревшая часть образца.

Перемещение вещества за фронтом химической реакции в конденсированной системе может существенно влиять на процесс прохождения волны горения через инертную преграду, и для выяснения особенностей такого влияния крайне необходимы данные, получаемые экспериментально для реальных конденсированных систем.

Основной параметр, интегрально характеризующий процесс прохождения волны горения через инертную преграду, — время задержки  $\tau_s$ . Экспериментальное определение зависимости этого параметра от толщины преграды  $\delta$ , согласно [5], дает возможность определить в том числе и кинетические характеристики конденсированной системы.

Подходящим способом регистрации времени задержки является метод, основанный на непрерывном измерении осевого усилия  $F$ , создаваемого горящим образцом [8]. Осевое усилие создается и поддерживается в процессе горения образца за счет давления  $p$  выделяющейся в зоне фронта горения газовой фазы. В момент остановки фронта горения (например, при встрече с преградой) газовыделение в зоне фронта горения прекращается, а находящийся в порах шлака газ выходит наружу,

\*То есть шлаками, которые, уступая напору механических усилий, действующих на них в горячей системе, легко уплотняются, приводя к уменьшению линейных размеров сгоревшей поджигающей таблетки или сгоревшей части образца.

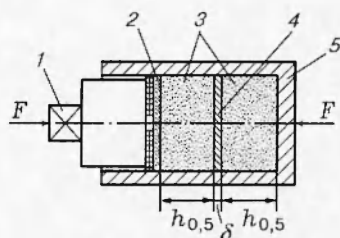


Рис. 1. Лабораторная сборка:

1 — датчик осевого усилия, 2 — поджигающая таблетка из смеси  $Zr + WO_3$ , 3 — образец из смеси  $Ti + C + 20\% TiC$ , 4 — преграда из тантала, 5 — стальная оболочка

приводя к снижению осевого усилия по закону, близкому к экспоненциальному. Начало такого резкого снижения осевого усилия определяет момент остановки фронта горения. При возобновлении процесса горения (за преградой) вновь появляется газовая фаза и давление (а соответственно, и осевое усилие) начинает возрастать. Начало возрастания осевого усилия определяет момент возобновления процесса горения конденсированной системы. Таким образом, по результатам непрерывного измерения осевого усилия достаточно однозначно определяется время задержки прохождения волны горения через инертную преграду в конденсированной системе. Но условия сжигания образцов при этом должны быть такими, чтобы соотношение

$$p = F/S, \quad (1)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения образца, выполнялось достаточно строго.

Для системы  $Ti + C + 20\% TiC$  соотношение (1) в диапазоне значений  $p = 3 \div 30$  МПа, обычно реализующихся в опытах, выполняется с погрешностью, не превышающей 10% [9].

В образцах из смеси  $Ti + C + 20\% TiC$  при определенных условиях наблюдается весьма большое перемещение вещества за фронтом реакции. При горении таких образцов хорошо выполняется соотношение (1), позволяющее путем непрерывного измерения осевого усилия экспериментально оценивать время  $\tau_s$ . Все это определило выбор системы  $Ti + C + 20\% TiC$  для наших исследований.

Опыты проводили с использованием лабораторных сборок, снабженных датчиком осевого усилия (рис. 1). В образцах диаметром 25 мм размещалась инертная преграда из танталовой ленты толщиной от 10 мкм до 0,6 мм. Ма-

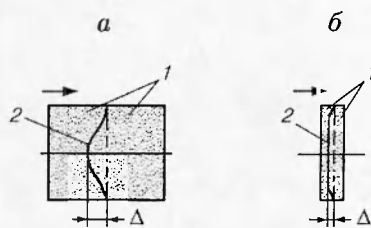


Рис. 2. Конфигурация преграды после сгорания образца:

$h_{0,5} = 15$  (а) и 3 мм (б); 1 — шлак, 2 — преграда; стрелкой указано направление движения фронта горения во время сжигания образцов, а штриховой линией — положение преграды перед сжиганием образца

териал преграды выбран из условия сохранения ее целостности (при возможном изменении конфигурации) в течение всего процесса прохождения волны горения сквозь такую преграду. В соответствии с этим условием температура плавления материала преграды должна быть выше температуры горения исследуемой смеси, которая по данным работ [10, 11] находится в диапазоне  $2500 \div 2800$  К.

Для ликвидации в исходном состоянии зазора между кромкой преграды и стенкой стальной оболочки лабораторной сборки диаметр преграды был больше внутреннего диаметра стальной оболочки на величину  $0 \div 0,05$  мм. Преграда делила образец на две равные части высотой  $h_{0,5}$ . Остальные характеристики лабораторных сборок даны в [7, 9].

Было проведено две серии опытов, различающихся величиной перемещения вещества в горящем образце. В первой серии опытов  $h_{0,5} = 15$  мм и перемещение частиц сгоревшей смеси вдоль оси образца в зоне расположения преграды достигало  $\sim 4,5$  мм. Во второй серии опытов  $h_{0,5} = 3$  мм, что обеспечивало минимальное перемещение вещества при горении образца, не превышающее 1 мм в зоне расположения преграды.

Перемещение вещества в горящих образцах оценивали по деформации преграды  $\Delta$ , измеряемой непосредственно после извлечения шлаков из лабораторной сборки (рис. 2). Этому способствовало то, что шлаки образцов легко разделяются на две части по поверхности, образуемой деформированной преградой. Измерения показали, что величина  $\Delta$  практически не зависит от толщины танталовой преграды в диапазоне значений  $\delta = 10 \text{ мкм} \div 0,5 \text{ мм}$  и

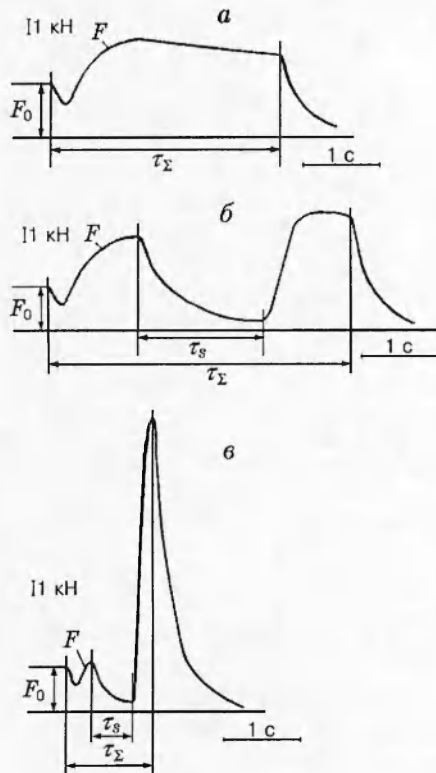


Рис. 3. Осциллограммы изменения осевого усилия  $F$ :

$a$  —  $h_{0,5} = 22$  мм ( $h = 44$  мм), преграда отсутствует;  $b$  —  $h_{0,5} = 15$  мм,  $\delta = 0,3$  мм;  $c$  —  $h_{0,5} = 3$  мм,  $\delta = 0,3$  мм;  $F_0 = 3$  кН — начальное осевое усилие;  $\tau_s$  — суммарное время горения поджигающей таблетки и образца вместе с временем задержки

определяется в основном свойствами конденсированных продуктов горения смеси, составляя  $\approx 30\%$  от первоначальной полувысоты образца.

Типичные осциллограммы изменения осевого усилия при сжигании образцов в лабораторных сборках показаны на рис. 3. Полученные по таким осциллограммам значения  $\tau_s$  (для разных значений  $\delta$ ) представлены на рис. 4. Необходимо отметить, что при толщине танталовой преграды 0,6 мм смесь за преградой не воспламеняется ни при  $h_{0,5} = 15$  мм, ни при  $h_{0,5} = 3$  мм. При этом преграда после опыта остается плоской, как и примыкающий к ней торец сгоревшей части образца.

Обращает на себя внимание тот факт, что осевое усилие, возникающее при горении смеси за преградой, в большинстве опытов превышает значение  $F$ , достигаемое при подходе фронта горения к преграде. Это объясняется тем,

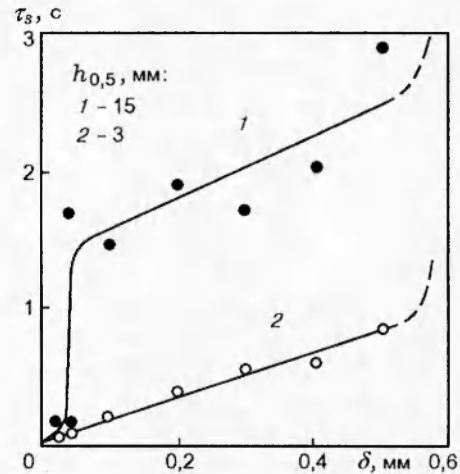


Рис. 4. Зависимости  $\tau_s(\delta)$

что преграда создает дополнительное сопротивление выходу примесного газа, выделяющегося горячей за преградой смесью, что приводит к большему уровню давления и, как следствие, к увеличению осевого усилия. При этом сопротивление выходу газа, оказываемое преградой, определяется величиной зазора, образующегося между кромкой преграды и стенкой сборки в результате деформирования самой преграды при горении образца. Деформация преграды, соответственно, и зазор при  $h_{0,5} = 15$  мм значительно больше, чем при  $h_{0,5} = 3$  мм. В результате сопротивление выходу газа, а следовательно, давление и осевое усилие при горении смеси за преградой в первом случае обычно заметно ниже, чем во втором (см. рис. 3).

Из данных рис. 4 следует, что при  $h_{0,5} = 15$  мм график зависимости  $\tau_s(\delta)$  имеет вид «ступеньки» (резкий переход времени задержки из области значений  $0,1 \div 0,15$  с в область значений  $1,5 \div 2,9$  с наблюдается при  $\delta \approx 20$  мкм, кривая 1), в то время как при  $h_{0,5} = 3$  мм график зависимости  $\tau_s(\delta)$  близок к линейному виду (кривая 2), ожидаемому в соответствии с [5, 6]. Существенное (примерно на порядок) ступенчатое изменение  $\tau_s$  на определенной толщине инертной преграды при увеличении  $h_{0,5}$  с 3 до 15 мм достаточно неожиданно. Действительно, увеличение полувысоты образца уменьшает тепловой поток в преграду за счет энергии поджигающей таблетки (что возможно при  $h_{0,5} = 3$  мм) и снижает теплопотери в стальную оболочку за время прохождения волны горения до преграды. Это должно было бы вызвать увеличение угла наклона гра-

фика  $\tau_s(\delta)$ , полученного для  $h_{0,5} = 3$  мм, без существенного изменения характера графика. Причиной заметного различия тепловых потоков в преграду, реализующихся при  $h_{0,5} = 3$  и 15 мм, может служить и то обстоятельство, что в левой части лабораторной сборки на длине  $h_{0,5} = 3$  мм, возможно, не успевает сформироваться стационарная волна горения, в то время как на длине  $h_{0,5} = 15$  мм волна горения, по-видимому, уже стационарная.

Однако, вероятнее всего, причина ступенчатого изменения времени задержки при определенной критической толщине преграды  $\delta_r$  ( $\delta_r \approx 20$  мкм для лабораторной сборки с  $h_{0,5} = 15$  мм) связана с особенностями динамики перемещения продуктов горения за фронтом химической реакции в образце. В условиях, когда за фронтом горения возникает подвижка шлаков, значения  $\tau_s$  будут зависеть от изменения во времени текущих значений теплофизических характеристик слоя шлаков, расположенного перед преградой, при постоянно меняющейся плотности («рыхлости») шлаков. В результате перемещения вещества перед преградой в течение некоторого эффективного времени  $\tau_r$  формируется область пониженной плотности шлаков — «рыхлый слой», обладающий существенно меньшим теплосодержанием и меньшей теплопроводностью, чем шлак в момент образования. При  $\delta < \delta_r$  прохождение тепловой волны через преграду завершается воспламенением расположенной за преградой смеси до окончания формирования рыхлого слоя, т. е. при еще достаточно большой плотности шлаков, что и обуславливает значения  $\tau_s$ , равные  $0,1 \div 0,15$  с. В противном случае, когда  $\delta > \delta_r$  и время прохождения тепловой волны больше времени формирования рыхлого слоя, сформировавшийся рыхлый слой резко ухудшает условия передачи тепловой волны через преграду и, как следствие, резко увеличивает время задержки воспламенения. Причем в последнем случае время задержки уже слабо зависит от толщины преграды, так как в основном определяется теплофизическими характеристиками образовавшегося перед преградой рыхлого слоя. Таким образом, критерием обеспечения реализации времен задержки из области значений  $\tau_s = 0,1 \div 0,15$  с является выполнение неравенства  $\tau_s < \tau_r$ . При его невыполнении система может резко перейти в другое состояние, характеризующееся временами задержки из области значений  $\tau_s \gg \tau_r$ , что и наблюдается при  $h_{0,5} = 15$  мм, когда рыхлый слой имеет

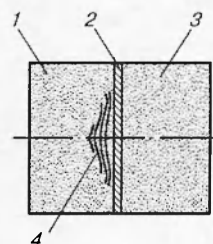


Рис. 5. Состояние шлаков сгоревшей части образца с  $h_{0,5} = 15$  мм при невоспламенении смеси за преградой:

1 — шлаки сгоревшей части образца, 2 — танталовая преграда толщиной 0,6 мм, 3 — несгоревшая часть образца, 4 — зона рыхлого слоя, в которой наблюдается еще и расслоения шлака

глубину  $\approx 5$  мм.

При  $h_{0,5} = 3$  мм полномасштабный рыхлый слой шлаков физически не может образоваться из-за ограниченного исходного размера системы (полувысоты образца). По-видимому, это обстоятельство в совокупности с другими, обуславливающими более высокий тепловой поток в преграду, и не позволяет проявиться влиянию образующегося незначительного (глубиной  $\approx 1$  мм) рыхлого слоя шлаков в диапазоне  $\delta = 10 \div 500$  мкм.

Рыхлый слой шлаков смеси визуально наблюдается на разломе сгоревшей части образца в зоне, примыкающей к танталовой преграде толщиной 0,6 мм (рис. 5), где он образуется после прихода фронта горения к преграде и сохраняется, поскольку смесь за преградой не воспламеняется. В случае же воспламенения смеси за преградой меньшей толщины рыхлый слой оказывается деформированным (смятым) давлением газовой фазы, выделяемой горячей за преградой смесью. Наблюдаемая после опыта деформация дает возможность судить о степени понижения плотности шлака в этом рыхлом слое.

Согласно рис. 4 (кривая 1) перед танталовой преградой в образцах из смеси при  $h_{0,5} = 15$  мм значение  $\tau_r$  можно оценить величиной  $\approx 10^{-1}$  с, поскольку это время должны быть одного порядка с временем задержки из области значений  $\tau_s = 0,1 \div 0,15$  с, получаемых при толщине преграды, близкой к критической. Время формирования рыхлого слоя за движущимся фронтом горения, по-видимому, того же порядка. А знание хотя бы порядка величины  $\tau_r$  полезно для прояснения особенностей распространения волны горения в конденсированных

системах, в которых реализуется заметное перемещение вещества за фронтом реакции. Поэтому возможность оценить эффективное время формирования области пониженной плотности шлаков, движущейся за фронтом горения, путем проведения опытов с преградами разной толщины представляется весьма важной и в методическом аспекте.

Таким образом, полученные при  $h_{0,5} = 15$  мм результаты показывают, что при значительном перемещении шлаков за фронтом химической реакции процесс прохождения волны горения сквозь инертную преграду приобретает более сложный характер. Для адекватного описания такого процесса (особенно при  $\delta > \delta_r$ ) необходим математический аппарат, отличающийся, например, от представленного в работах [5, 6], наличием дополнения, учитывающего влияние перемещения вещества за фронтом горения конденсированной системы на рассматриваемый процесс.

Использованный экспериментальный метод определения времени задержки прохождения волны горения сквозь преграду можно применить и к другим конденсированным системам, для которых достаточно хорошо выполняется соотношение (1). Это позволяет получить зависимости  $\tau_s(\delta)$  (в случае перемещения вещества за фронтом горения) для оценки ряда важных параметров ( $\delta_r$ ,  $\tau_r$  и др.). Если же перемещение вещества практически отсутствует, то в соответствии с работой [5] можно определять и кинетические характеристики конденсированной системы.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВНИИ экспериментальной физики Н. М. Колобяниной, В. Н. Голубевой, В. В. Островскому, С. А. Другову и В. А. Коротину за помощь в проведении опытов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Новиков С. С., Рязанцев Ю. С. Прохождение распространяющейся по пороху волны горения сквозь инертную преграду // Докл. АН СССР. 1969. Т. 187, № 3. С. 616–618.
- Novikov S. S., Ryazantsev Yu. S. Penetration of the flame front through a fine metal layer in a solid propellant // AIAA Journal. 1970. V. 8, N 7. P. 1347–1349.
- Голубев В. А., Проскудин В. Ф., Бережко П. Г. и др. О влиянии усадки шлаков поджигающей таблетки на параметры зажигания // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 41–44.
- Бережко П. Г., Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Беляев Е. Н. О возможности повышения мощности воспламенителя. М.: ЦНИИ-атоминформ, 1991. (Препр. / РФЯЦ. ВНИИЭФ, № 17-91).
- Берман В. С., Новиков С. С., Рязанцев Ю. С. О прохождении волны горения, распространяющейся по конденсированному веществу, сквозь инертную преграду // Докл. АН СССР. 1973. Т. 211, № 5. С. 1153–1155.
- Крайнов А. Ю. Влияние теплофизических характеристик инертной преграды и теплопотерь на распространение волны горения // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 6. С. 16–19.
- Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф. и др. О перемещении вещества воспламенителя и образца при горении безгазовых систем в жесткой оболочке // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 93–97.
- Голубев В. А., Бережко П. Г., Проскудин В. Ф., Малышев А. С. О возможности непрерывного измерения давления во фронте горения пиротехнических составов, дающих твердые продукты реакции // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 67–70.
- Проскудин В. Ф., Голубев В. А., Бережко П. Г. Измерение давления во фронте горения безгазовых пиротехнических систем с низкой газопроницаемостью // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 76–81.
- Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Нерсесян М. Д., Мержанов А. Г. Электрохимические явления в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. РАН. 1996. Т. 351, № 6. С. 780–782.
- Маслов В. М., Воюев С. И., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. О роли дисперсности инертных разбавителей в процессах безгазового горения // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 4. С. 74–80.

Поступила в редакцию 18/VIII 1997 г.,  
в окончательном варианте — 21/I 1998 г.