

Указанные особенности формирования зоны горения свидетельствуют о том, что закрутка потока способствует стабилизации горения, позволяет уменьшить размеры реактора и увеличить его теплонапряженность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайдель Р. М., Зельдович Я. Б. О возможных режимах стационарного горения // ПМТФ.— 1963.— № 4.— С. 27—32.
2. Мержанов А. Г., Филоненко А. К. О тепловом самовоспламенении гомогенной газовой смеси // Докл. АН СССР.— 1963.— 152, № 1.— С. 143—146.
3. Максимов Э. И., Перегудов Н. И., Бутаков А. А. Критические условия воспламенения в ламинарном потоке // ФГВ.— 1975.— 11, № 4.— С. 895—898.
4. Лилли Д. Обзор работ по горению в закрученных потоках // РТК.— 1977.— 15, № 8.— С. 8—12.
5. Госмен А. Д., Пап В. В., Ранчел А. Л. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости.— М.: Мир, 1972.
6. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах.— М.: Машиностроение, 1982.
7. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки.— М.: Мир, 1987.
8. Устименко Б. П., Джакупов К. Б., Крель В. О. Численное моделирование аэродинамики и горения в точечных и технологических устройствах.— Алма-Ата: Наука, 1986.

г. Томск

Поступила в редакцию 23/VIII 1989,
после доработки — 8/VI 1990

УДК 536.46

*В. А. Голубев, П. Г. Бережко, В. Ф. Проскудин,
А. Я. Малышев, И. К. Кремзуков, Е. Н. Беляев,
В. В. Островский, С. К. Гришечкин*

О ПЕРЕМЕЩЕНИИ ВЕЩЕСТВА ВОСПЛАМЕНИТЕЛЯ И ОБРАЗЦА ПРИ ГОРЕНИИ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ В ЖЕСТКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Приведены результаты изучения горения безгазовой системы Ti + C (разбавленной на 20 % карбидом титана), находящейся вместе с поджигающей таблеткой из смеси $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + 4\text{B}$ в жесткой оболочке. Показано, что горение сопровождается перемещением вещества с возникновением волны разгрузки (резкого уменьшения плотности в области фронта горения), приводящей к изменению скорости горения.

Известно, что горение безгазовых систем при сжигании в виде образцов с открытыми торцами обычно сопровождается их удлинением [1—3]. При этом скорость горения образца зависит от того, насколько условия сжигания позволяют ему удлиниться в процессе горения, что говорит о большой важности учета этого фактора при анализе закономерностей горения [1, 4].

Особый интерес представляет случай, когда система находится в жесткой оболочке, не позволяющей ей изменить в сторону увеличения свои внешние геометрические размеры. Перемещение вещества в такой системе может наблюдаться, когда для ее зажигания используют воспламенитель в виде таблетки из другого пиротехнического состава. И если температура горения таблетки достаточно высока, а ее продукты реакции вследствие этого имеют сразу после сгорания низкую механическую прочность (например, из-за плавления одного из входящих в продукты реакции веществ), то под действием сил, возникающих при горении, они будут уплотняться, позволяя образцу удлиниться.

Для экспериментального изучения поведения безгазовой системы в таких условиях выбрана стехиометрическая смесь Ti + C (титан электролитический ПТОМ-2, сажка марки ПМ-15), разбавленная на 20 % порошком карбида титана по ТУ6-09-492-75. Образцы поджигали таблетками из смеси $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} + 4\text{B}$ (окись хрома по ТУ6-09-4272-76, алюми-

Рис. 1. Схема лабораторной сборки.

ний марки АСД-4, бор аморфный). Выбор данной системы обусловлен тем, что при ее горении один из компонентов продуктов реакции (Al_2O_3) находится в расплавленном состоянии. Обе смеси готовили тщательным перемешиванием исходных компонентов в шаровой мельнице.

Лабораторная сборка для сжигания смесей (рис. 1) включала в себя стальной стакан 8 (с запрессованным в него образцом 7 и таблеткой 6), пакет из стальных сеток 5 для выхода примесных газов, выделяющихся при горении смесей, и вкладыш 4, содержащий электровоспламенитель для зажигания таблетки форсом пламени через центральное отверстие в стальных сетках.

Диаметр образца и таблетки 25 мм. Длина образца $l \approx 15$ мм, высота таблетки $h = 1 \div 15$ мм. Образец и таблетку запрессовывали в стакан лабораторной сборки усилием $5 \cdot 10^4$ Н (при этом относительная плотность образца составляла 0,7, таблетки — 0,6). Для оценки осевых усилий, реализуемых при горении смесей, между станиной 2 и вкладышем располагали тензометрический датчик 3. Винт 1 служил для создания начального осевого усилия F_n , которое составляло 10^3 Н. Вставка 10 из оргстекла, установленная в доньшке стакана, позволяла с помощью фотодиода регистрировать момент подхода фронта горения к торцу образца.

Лабораторные сборки до и после сжигания (а в некоторых опытах и в процессе горения образца) просвечивали рентгеновскими лучами с помощью импульсного рентгеновского аппарата МИН (длительность рентгеновского импульса на полувысоте составляет $\sim 20 \cdot 10^{-6}$ с). Для визуализации положения границы раздела между таблеткой и образцом устанавливали практически непрозрачную для рентгеновских лучей танталовую метку 9 (квадратная пластинка размерами 4×4 мм, вырезанная из фольги толщиной 0,4 мм).

На рис. 2 показана типичная осциллограмма изменения осевого усилия при горении таблетки и образца. Здесь видны характерные участки I и II, отвечающие окончанию горения таблетки и образца соответственно. Такие осциллограммы позволяют оценить время горения таблетки τ_T и образца τ_0 (значение τ_T оценивали сжиганием таблетки в отсутствие образца). По полученным экспериментальным данным скорость горения таблетки $u \approx 45$ мм/с.

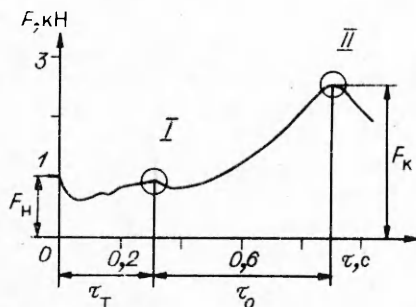
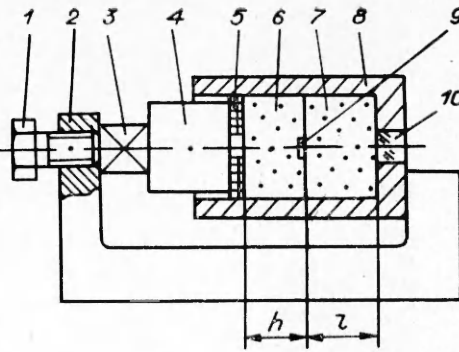


Рис. 2. Осциллограмма изменения осевого усилия при горении таблетки и образца (толщина таблетки ~ 15 мм).

I — выход фронта горения на торец таблетки (по показаниям фотодиода в опытах, где образец отсутствовал); II — выход фронта горения на торец образца (по показаниям фотодиода).

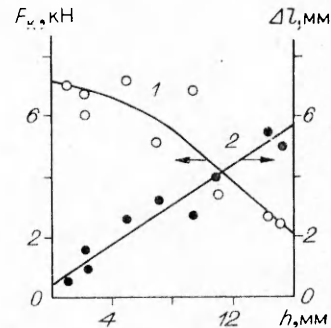


Рис. 3. Зависимость максимального осевого усилия, возникающего при горении образца (1), и удлинения образца (2) от толщины поджигающей таблетки.

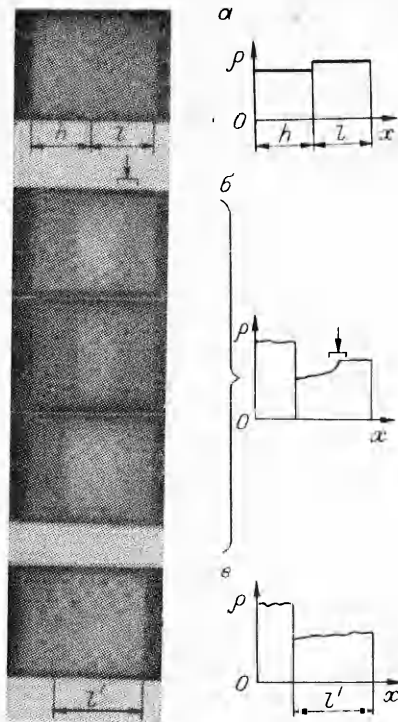


Рис. 4. Рентгеновские снимки лабораторных сборок и графики изменения плотности таблетки и образца (положение таблетки и образца на снимках обозначено размерами h и l соответственно; l' — длина образца после сгорания).

a — до сжигания; b — в момент горения образца (ожидаемое положение фронта горения, оцененное с учетом того, что время от момента задействования электровоспламенителя до момента рентгеновского просвечивания составляло $\sim 0,7$ с, показано стрелкой); v — после сгорания таблетки и образца.

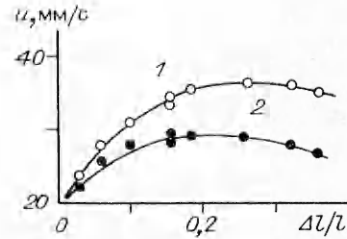


Рис. 5. Зависимость истинной (1) и наблюдаемой (2) скорости горения образца от его относительного удлинения.

Кроме того, определяли усилие, действующее на продукты горения таблетки со стороны удлиняющегося горящего образца, которое оказалось довольно значительным — в момент подхода фронта к торцу образца величина F_k достигала нескольких килоньютон. Как видно из рис. 3, с увеличением h значение F_k падает, а удлинение образца Δl (Δl определяли по изменению положения танталовой метки на рентгеновских снимках, сделанных до и после сжигания) линейно возрастает. Уменьшение F_k можно объяснить тем, что с ростом h образцу создается большая возможность разгрузки при горении.

Удлинение образца, обусловленное выделением примесных газов (в основном в зоне прогрева [5, 6]), приводит из-за роста давления к расширению этой зоны [7], вследствие чего фронт горения распространяется в движущемся навстречу ему веществе образца [1]. При этом в области фронта горения плотность образца изменяется от исходной ρ_0 (перед зоной прогрева) до некоторой конечной ρ'_0 (за фронтом горения), определяемой степенью удлинения образца. Таким образом, в горящем образце вместе с фронтом горения движется волна изменения плотности, которую можно назвать волной разгрузки. Существование последней подтверждает рентгеновская съемка горящих образцов. На рис. 4 приведены снимки лабораторных сборок и графики, качественно интерпретирующие перераспределение плотности таблетки и образца в процессе горения. При построении графиков учитывалось, что, согласно измерениям, массы таблетки и образца после сгорания практически не изменяются.

Перераспределение плотности в области фронта, вызывая соответствующие изменения теплофизических характеристик (в частности, температуропроводности), сказывается на величине скорости горения, обуславливая зависимость последней от удлинения образца [1, 4, 7]. Изменяется и истинная [1, 8] скорость горения образцов из смеси $Ti + C + 20\% TiC$ в зависимости от относительного удлинения (при зажигании таблетками из смеси $Cr_2O_3 + 2Al + 4V$ разной толщины). На рис. 5 видно, что в диапазоне $\Delta l/l = 0 \div 0,25$ истинная скорость горения образцов растет, а затем начинает снижаться. Это хорошо согласуется с характером зависимости $u(\rho'_0)$ системы $Ti + C$ [9] (если $\rho'_0 = \rho_0 \frac{l}{l + \Delta l}$), что по-

казывает определенную однозначность поведения скорости горения такой системы при уменьшении ρ_0 как в специальных опытах, так и в случае горения, сопровождающегося удлинением образца (определяемым в данном случае толщиной поджигающей таблетки). По-видимому, и для многих других безгазовых систем, заключенных вместе с поджигающей таблеткой, имеющей «податливые» продукты горения, в жесткую оболочку с газовыводом со стороны таблетки, следует ожидать наличия зависимости $u(h)$, обуславливающей глубину перераспределения плотности в зоне фронта горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей титана и бора/АН СССР. ОИХФ.—Препр.—Черноголовка, 1978.
2. Мучник С. В., Лыничак К. А., Дубов А. П. Образование фосфида CO_2P в режиме горения // ФГВ.—1983.—19, № 1.—С. 39.
3. Рогачев А. С., Шкиро В. М., Чаусекая И. Д. и др. Безгазовое горение в системе титан — углерод — никель // ФГВ.—1988.—24, № 6.—С. 86.
4. Филоненко А. К., Бунин В. А., Вершинников В. И. // Хим. физика.—1982.—№ 2.—С. 260.
5. Филоненко А. К., Вершинников В. И. // Там же.—1984.—3, № 3.—С. 430.
6. Щербаков В. А., Сычев А. Е., Штейноерг А. С. Макрокинетика дегазации в процессе СВС // ФГВ.—1986.—22, № 4.—С. 55.
7. Вершинников В. И., Филоненко А. К. О зависимости скорости безгазового режима горения от давления // Там же.—1978.—14, № 5.—С. 42.
8. Найбороденко Ю. С., Касацкий И. Г., Лавренчук Г. В. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем: Материалы VI Всесоюз. симп. по горению и взрыву.—Черноголовка, 1989.
9. Шкиро В. М., Боровинская И. П. // Процессы горения в химической технологии и металлургии/Под ред. А. Г. Мержанова.—Черноголовка, 1975.

г. Москва

Поступила в редакцию 29/XI 1989,
после доработки — 31/VIII 1990

УДК 662.215.1

А. Д. Зинченко, В. И. Сдобнов, В. И. Таржанов,
Б. Б. Токарев, А. И. Погребов

ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПОРИСТОЕ ВВ БЕЗ ЕГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

Изучены кратерообразование в образцах пористых ВВ, изменение светопропускания тонких слоев ВВ и искажение формы световых импульсов, пропущенных ими, при плотностях энергии лазерного излучения, не приводящих к инициированию ВВ. Показано, что эти явления — следствие оптического пробоя диэлектрика (ВВ), процесса, разграничивающего по плотности энергии излучения диапазоны линейного и нелинейного взаимодействия света с ВВ.

В работах [1—8] рассматривается воздействие лазерного излучения на ВВ с энергией в импульсе, близкой и выше пороговой (критической) энергии инициирования (зажигания). Представляет интерес изучение лазерного воздействия на ВВ и при меньших значениях энергии, при которых могут наблюдаться [2] такие явления, как образование кратеров (каверн) и снижение коэффициента отражения ВВ.

В данной работе исследовалось образование кратеров в порошкообразных подпрессованных ВВ, светопропускание в тонких слоях и форма лазерного импульса, пропущенного слоями, при энергиях в импульсе воздействия, меньших энергии инициирования.

Постановка экспериментов аналогична [4]. Использовался лазер на неодимовом стекле в режиме модуляции добротности резонатора с импульсами длительностью $35 + 5$ нс с энергией до $E = 4,5$ Дж ($\lambda = 1,06$ мкм). Величина E измерялась измерителем энергии ИКТ-1М. Светопропускание слоев ВВ изучали при помощи фотометрического шара,