

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН ПРИ БЕЗГАЗОВОМ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ СМЕСЕЙ В ОБОЛОЧКЕ

УДК 536.46.536.66

**В. П. Кобяков, В. М. Мальцев, Л. Б. Машкинов,
И. Д. Чашечкин**

Институт структурной макрокинетики РАН, 142432 Черноголовка

Исследовано распределение температуры на локальном участке поверхности оболочки, вдоль оси которой распространяется волна горения смеси порошков топлива и окислителя. Использованы различные топливные смеси и оболочки с разной толщиной стенки, изготовленные из различных материалов. Исследованы концевые эффекты. Проанализированы условия, влияющие на характер теплоотдачи от действующего тепловыделяющего элемента с зарядом топливной смеси.

К настоящему времени основные достижения в области макрокинетики процессов твердофазного безгазового автоволнового горения связаны с развитием двух новых взаимосвязанных научных направлений — структурной макрокинетики и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1]. Существенное значение в их развитии имеют исследования тепловых волн, распространяющихся по твердой смеси порошков окислителя и топлива от точки инициирования горения. Весьма важную роль играют эти исследования и в развитии еще одного направления — «энергетического» использования процесса безгазового горения [2].

В данной работе исследуются некоторые термические характеристики бегущей тепловой волны, распространяющейся вдоль оси цилиндрической непрозрачной оболочки с запрессованными в нее модельными топливными смесями порошков титана с углеродом ($Ti:C=1$) либо с бором ($Ti:B=0,5$). Тепловыделение при горении составляет 3 и 4 МДж/кг соответственно.

В экспериментах использовались порошок титана марки ПТОМ со средней дисперсностью ~ 63 мкм, сажа марки П-408 и аморфный бор марки 99А.

Исследования проводились в экспериментальных тепловыделяющих ячейках двух типов. В первой серии экспериментов использовались толстостенные цилиндрические стальные оболочки, закрытые торцевыми крышками с уплотняющими прокладками. Между крышками тепловыделяющей ячейки и зарядом топливной смеси помещались теплоизолирующие втулки. Крышки стягивались между собой шпильками, которые одновременно фиксировали сборку на опоре, укрепленной на оптической скамье измерительного стенда. В первой серии экспериментов внутренний диаметр оболочки $d = 20$ мм, длина заряда топливной смеси $l = 25$ мм, толщина оболочки $\delta = 1, 2$ и 3 мм. Размеры тепловыделяющей ячейки выбирались с учетом возможности ее использования в устройстве с жесткими требованиями к объемной компактности теплового источника. Инициировали горение вольфрамовой спиралью, введенной через верхнюю крышку сборки.

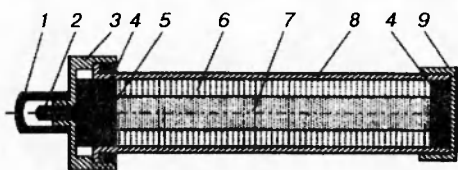


Рис. 1. Схема тепловыделяющего элемента:

1 — предохранительный колпачок; 2 — запальная смесь 1; 3 — накидная гайка; 4 — теплоизоляция; 5 — запальная смесь 2; 6 — высокотемпературная топливная смесь; 7 — среднетемпературная топливная смесь; 8 — оболочка; 9 — крышка

Температура фиксированного участка оболочки в диапазоне 450–1800 К измерялась инфракрасным пирометром полного излучения IRP-1 в спектральном интервале 2,0–2,5 мкм (погрешность не превышала 3%). В области $T = 1300 \div 2700$ К использовался фотоэлектронный пирометр видимого спектра ЯНТАРЬ-6515. Яркостная температура в локальном участке спектра с длиной волны $\sim 0,65$ мкм измерялась с погрешностью, не превышающей 5%. Для определения скорости распространения фронта волны горения и температуры по длине оболочки применялись вольфрам-рениевые термопары ВР-5/20, зачеканенные в оболочку с шагом 3 мм, а также бесконтактный метод с использованием многоканального анализатора излучения. Электрические сигналы приборов регистрировались светолучевым осциллографом НО71,6М с согласующим устройством ФО23. Следует отметить, что результаты, полученные с помощью разных приборов, практически совпадали.

Другая серия экспериментов была выполнена в оболочках из тантала с наружным диаметром 12 мм ($l = 100$ мм, $\delta = 0,2$ мм). Эти оболочки являлись основной частью конструкции автономных тепловыделяющих элементов, схематически изображенных на рис. 1. Во время эксперимента тепловыделяющий элемент закреплялся на оптической скамье с помощью теплоизолирующей втулки, чтобы свести к минимуму кондуктивные теплопотери. Регистрация температуры участка поверхности оболочки, расположенного на середине длины последней, осуществлялась радиационным термoeлементом (болометром) РТН-30 СМ. Чувствительный элемент такого болометра (блок термопар) наносился на плату методом вакуумного напыления. На наружной поверхности оболочки тепловыделяющей ячейки были закреплены контрольные термопары ВР-5/20.

На рис. 2 показано изменение температуры фиксированного участка центральной части оболочки функционирующей тепловыделяющей ячейки. Линии, которые фактически представляют собой пространственно локализованные профили бегущей тепловой волны, построены с использованием программы Graph 1.3 в оболочке Microsoft Windows 3.1. Можно видеть (кривая 1), что на оболочке в течение ~ 10 с удается получить температуру ~ 2500 К. Стальная оболочка при этом, естественно, проплавляется, и измерения выполняются только с помощью пирометра. Необходимо указать, что полное сгорание заряда топливной смеси происходило за $\sim 1,5$ с. Для достижения же максимальной температуры оболочки требовалось времени в несколько раз больше. Тепловая инерция в данном случае зависит от кинетики растекания тепла от горячей смеси, температуропроводности и теплоемкости материала оболочки, а также от массы всей конструкции. В рассматриваемом здесь варианте укороченного заряда существенное значение имеют концевые эффекты.

Со всеми этими обстоятельствами связан также уровень максимальной температуры

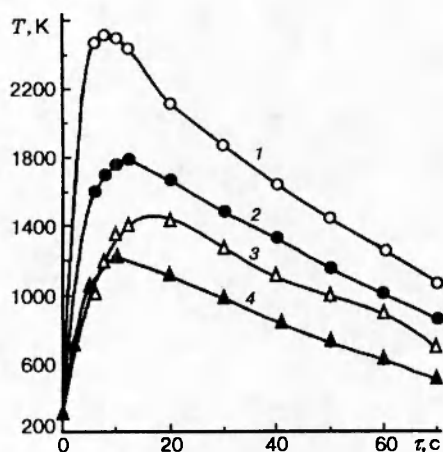


Рис. 2

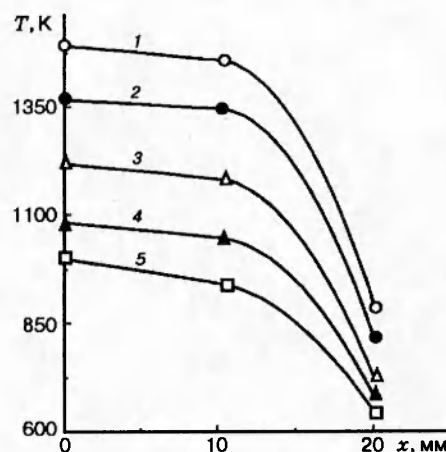


Рис. 3

Рис. 2. Кинетика разогрева и остывания локального участка поверхности стальной оболочки тепловыделяющего элемента:

1-3 — смесь $Ti+2B$; 4 — $Ti+C$; δ , мм: 1, 4 — 1, 2 — 2, 3 — 3

Рис. 3. Температурный профиль по длине стальной оболочки тепловыделяющего элемента после сгорания заряда топливной смеси $Ti+2B$:

τ , с: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50

на наружной поверхности оболочки. Можно видеть, что значения $T > 2000$ К возможны лишь при использовании тонкостенных оболочек ($\delta \leq 1$ мм). В этом случае, естественно, требуется материал оболочки, имеющий достаточно высокую точку плавления. Кривые на рис. 2 построены с помощью аппроксимации результатов измерений полиномом 5-й степени. Несмотря на ограниченное число экспериментальных точек в районе максимума кривых, наблюдается смещение последнего по оси времени в зависимости от толщины стенки оболочки.

Самой медленной стадией является остывание. Форма кривой 1 на рис. 2 указывает на присутствие радиационной составляющей, тогда как вид кривой 3 свидетельствует о ее минимальном вкладе в тепловой поток от оболочки к спокойному воздуху лабораторного помещения. Видно также, что использование смеси с более низким тепловыделением (кривая 4), не позволяет достичь высокотемпературной области ($T \geq 1300$ К) даже при $\delta = 1$ мм.

О величине краевого эффекта можно судить по данным рис. 3, которые получены для стальной ячейки с увеличенной вдвое длиной оболочки ($l = 50$ мм, $d = 20$ мм, $\delta = 3$ мм). Видно, что, несмотря на наличие теплоизолирующих втулок и уплотнительных прокладок, присутствие в конструкции макета массивных крышек способствует интенсивному оттоку тепла. Это влияние особенно сильно проявляется на расстоянии ≤ 10 мм от крышек. Отсюда следует, что в принятой геометрии экспериментов в тепловом балансе функционирующей ячейки теплопроводность играет весьма существенную роль.

При $T < 1500$ К, судя по линейному спаду температуры на кривых рис. 2, эта роль становится определяющей.

Ясно, что в ячейке с укороченной вдвое оболочкой (как, например, в серии экспериментов, результаты которых представлены на рис. 2) краевой эффект выражен гораздо силь-

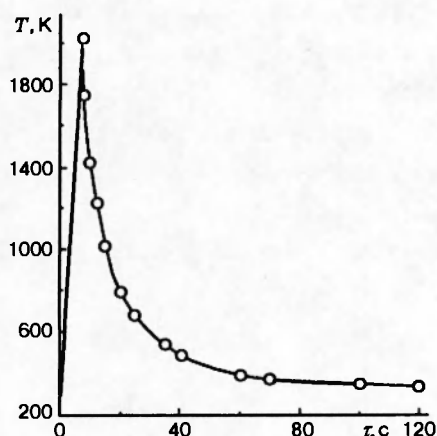


Рис. 4. Кинетика разогрева и остывания локального участка поверхности танталовой оболочки тепловыделяющего элемента с топливной смесью Ti+C

нее. По этой причине в конструкциях, где требуется максимально компактный тепловой источник, надо заранее примириться с неоптимальным использованием тепла, выделяющегося в такой ячейке. Во всех других случаях при проектировании тепловыделяющих элементов следует учитывать зону влияния концевго эффекта.

Результаты одного из экспериментов в танталовой оболочке увеличенной длины с зарядом Ti+C представлены на рис. 4. Как и следовало ожидать, в данном случае профиль тепловой волны существенно отличается от такового для толстостенных оболочек (см. рис. 2). Он характеризуется несколько более крутым передним фронтом, более высокой амплитудой и гораздо более резким спадом температуры. Максимальная температура, полученная в этом эксперименте (2020 К), значительно выше, чем в случае горения заряда смеси Ti+C в толстостенной стальной оболочке (1220 К) и приближается к максимальной температуре, полученной в первой серии при горении заряда более высокоэнтальпийной смеси Ti+2B (2520 К). При этом танталовая оболочка не только не прогорает, но и не подвергается катастрофическому окислению.

Профиль тепловой волны на рис. 4 внешне похож на профиль, полученный в [3] при горении заряда Ti+2B в кварцевой оболочке, т. е. в условиях минимальных кондуктивных и конвективных теплопотерь. Однако в данном случае временные координаты тепловой волны соответственно увеличены в ~ 300 раз. Сравнение рис. 4 и 2 с рис. 4 работы [3] позволяет заключить, что, в отличие от первой серии экспериментов, в данном случае значительная доля теряемого тепла приходится на радиационную составляющую. Из рис. 4 следует, что суммарное время пребывания наружной стенки тепловыделяющей ячейки в интервале высоких температур ($T \geq 1300$ К) составляет ~ 10 с. Как уже отмечалось, в случае горения заряда Ti+C в стальной оболочке это время равнялось нулю, а для заряда более высокоэнтальпийной смеси Ti+2B (см. рис. 2, кривая 1) оно составляло ~ 50 с. Следует также отметить, что данная конструкция тепловыделяющей ячейки позволяет значительно снизить торцевые теплопотери ($\leq 6\%$ радиационного потока).

Проведенное исследование показывает, что наблюдаемый пространственно локализованный профиль бегущей тепловой волны может быть существенным образом деформирован во времени и пространстве за счет теплопередачи через оболочку. Если говорить об исследовании тепловых волн с позиций изучения макрокинетики процессов горения как таковых, то лучшими материалами оболочки, по-видимому, являются прозрачные материалы (кварц, сапфир, фианиты). Что же касается «энергетического» использования волнового горения, то здесь оболочка является одной из основных составных частей тепловыделяю-

шего устройства. Изучение тепловых волн, распространяющихся в таких оболочках, необходимо как для построения физических моделей импульсных режимов тепловыделения, так и для разработки конструкций тепловыделяющих элементов. В частности, полученные результаты показывают, что температура излучающей поверхности легко регулируется подбором топливной смеси с различными уровнями тепловыделения, а также толщиной стенки оболочки тепловыделяющего элемента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-02-05658-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Merzhanov A. G.** Self-propagating high-temperature synthesis: twenty years of search and findings // *Combustion and Plasma Synthesis of High-Temperature Materials* / Eds Z. A. Munir, I. B. Holt. VCH Publisher, 1990. N 4.
2. **Kobyakov V. P., Maltzev V. M., Merzhanov A. G.** "Energetical" pyrotechnics: new facilities // *Proc. of the 21st Int. Pyrotechnics Seminar. Moscow, Russia, 11–15 Sept. 1995.* Moscow: Institute of Chem. Phys. RAS, 1995.
3. **Пономарев М. А., Щербаков В. А., Штейнберг А. С.** Закономерность горения тонких слоев порошковой смеси титан — бор // *Докл. РАН.* 1995. Т. 340, № 5. С. 642–645.

Поступила в редакцию 10/XI 1995 г.
