

К ВОПРОСУ О РОЛИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ СМЕСЕВОГО ТИПА

*С. А. Аbruков, Г. Н. Марченко,
Н. Н. Максимов, Б. А. Бабанакoв*

(Чебоксары)

В соответствии с современными представлениями горение конденсированных систем, в том числе и смесевых, представляет собой сложную последовательность самых разнообразных физико-химических процессов: химические реакции в конденсированной фазе, газификация конденсированной фазы, испарение, диспергирование и т. п. [1—5]. Существенные различия в свойствах исходных компонентов в составе смесевых систем (окислитель — горючее) позволяют считать, что в общей совокупности процессов их превращения при горении роль диспергирования может оказаться значительной.

Результаты детального теоретического рассмотрения модели одностадийного горения конденсированного вещества в дисперсном состоянии приведены в [6—8]. Модель постадийного горения нелетучих легкодиспергирующих веществ исследована в [9]. Для рассмотренного в [6] случая беспламенного горения, когда процесс осуществляется только за счет тепла, выделяющегося в к-фазе, взаимосвязь между скоростью горения и глубиной диспергирования имеет вид

$$u^2 = \frac{2}{(1 - \eta_g)^2} a k_0 \exp \left\{ - \frac{E}{R} \left[T_0 + \frac{Q(1 - \eta_g)}{c} \right]^{-1} \right\} \frac{c}{Q} \frac{R}{E} \left[T_0 + \frac{Q(1 - \eta_g)}{c} \right]^2,$$

где u — скорость горения; η_g — глубина диспергирования; a — коэффициент температуропроводности; k_0 — предэкспонент; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T_0 — начальная температура пороха; Q — теплота разложения; c — удельная теплоемкость.

Проведенный в [6] с использованием этого выражения расчет скорости горения пироксилинового пороха показал, что при условии полного исключения процесса диспергирования ($\eta_g = 0$) скорость его горения оказывается равной 2,50 м/с. Это позволило сделать вывод [6], что диспергирование выступает в роли мощного регулирующего фактора, интенсивность которого определяет действительный уровень значений температуры поверхности и соответственно скорости горения. Выполненный по приведенному выше выражению расчет скорости горения модельной смесевой композиции, состоящей из 20% полимеризованного углеводорода, 65% перхлората аммония и 15% алюминия, показал, что в предположении $\eta_g = 0$ расчетная величина скорости горения при атмосферном давлении оказывается близкой к 4 м/с. Исходные данные для расчета: $a = 1,85 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $k_0 = 3 \cdot 10^{11}$ 1/с, $R = 8,31 \times 10^3$ Дж/(кмоль·град), $T_0 = 293$ К, $Q = 5,46$ Дж/кг, $c = 1,32 \cdot 10^3$ Дж/(кг·град), $u = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с (эксперимент).

Эти результаты позволяют сделать вывод, что если в основе полученных различий в значениях ожидаемых и практически реализуемых скоростей горения действительно лежит явление диспергирования, то степень его развития должна быть достаточной для непосредственного наблюдения в процессе горения. В соответствии с этим настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию процесса диспергирования и рассмотрению влияния на характер этого процесса некоторых

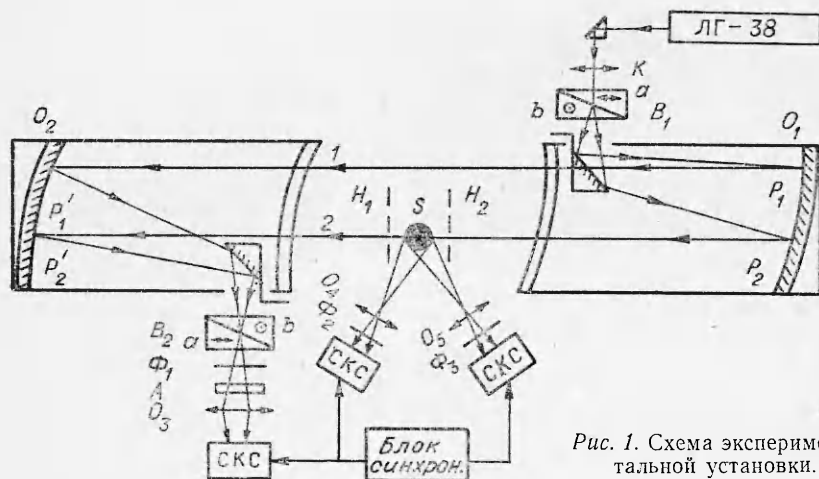


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

факторов, обуславливаемых различиями в компонентном составе исследуемой смеси.

Визуализация процесса горения образцов проводилась интерференционным методом и методом прямой киносъемки (рис. 1). Для интерферометрических исследований был использован поляризационный интерферометр сдвига на основе теневого прибора ИАБ-451 [11, 12]. Принцип интерферометров в поляризованном свете состоит в том, что при помощи двупреломляющей системы — призмы Волластона B_1 свет от лазерного источника ЛГ-38 разделяется на два пучка — 1 и 2. В приборе ИАБ-451 они смещены по отношению друг к другу на величину удвоения системы P_1P_2 и интерферируют после прохождения через вторую идентичную призму B_2 , в которой происходит компенсация разности хода между лучами 1 и 2, создаваемой первой призмой. Так как лучи когерентные, то после анализатора A наблюдается интерференционная картина. Конденсорная линза K служит для расширения лазерного света с целью получения необходимого диаметра рабочего поля интерферометра. Линза O_3 проектирует изображение интерференционной картины на экран. Исследуемый образец помещается между плоскостями H_1 и H_2 на пути одного из световых пучков. Интерференционная картина горения образцов снималась при помощи скоростных киносъемочных камер СКС-1М.

Одновременно с интерференционной картиной процесс горения образцов визуализировался прямой киносъемкой аппаратом СКС-1М, когда в кадр попадало изображение образца и всего факела, а также производилась киносъемка поверхности горения образца. Для этого использовались объективы O_4 и O_5 , которые позволяли получать изображение горящего образца с различным увеличением. Для уменьшения влияния фонового излучения пламени горящего образца на пути света в кинокамеры помещались специальные светофильтры Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 . Поджог образца и запуск кинокамер были синхронизированы при помощи блока синхронизации, что позволяло сопоставлять отдельные кадры интерференционного кинофильма с кадрами прямой киносъемки и микросъемки поверхности горения образца. Частоту съемки можно было менять от 100 до 5000 кадров в секунду. Это давало возможность работать с образцами в широком диапазоне изменений скорости горения.

На рис. 2—5 представлена серия кинофрагментов процесса горения ряда смесевых композиций, различающихся соотношением окислитель—горючее, средним размером частиц (близким к монодисперсному перхлората аммония), а также наличием ускоряющей процесс горения ферроценовой присадки. Приведенные снимки показывают, что при горении



Рис. 2. Кинограммы процесса горения модельной смеси. а) 20% полимеризованного углеводородного горючего, 80% перхлората аммония (средний размер частиц $3 \cdot 10^{-5}$ м); б) 14% полимеризованного углеводородного горючего, 70% перхлората аммония (средний размер частиц $25 \cdot 10^{-5}$ м), 16% алюминия.

всех исследованных систем диспергирование проявляется достаточно четко. Последнее имеет место как в металлизированных, так и в безметалльных композициях (см. рис. 2).

В соответствии с полученными данными характер диспергирования, по существу, отражает гетерогенность поверхности горения. В серии композиций, состоящей из 70% окислителя и 30% вулканизированного углеводородного каучука, степень искажения микрорельефа поверхности горения и связанное с этим повышение степени турбулизации пламени возрастают по мере повышения среднего размера частиц окислителя. Об этом же свидетельствует аналогичный характер изменения тепловой неоднородности в факеле пламени, о чем можно судить по степени нарушения интерференционной картины процесса (см. рис. 3). С повышением скорости горения за счет турбулизации пламени интерференционная картина искажается. Оценочная величина среднего размера диспергируемых частиц оказывается максимальной (до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м) у образцов с максимальным размером частиц окислителя.

Существенно, что аналогичное воздействие на микрорельеф поверхности горения оказывает изменение соотношения окислитель — горючее в сторону увеличения содержания последнего. В этом случае максимальное искажение микрорельефа поверхности горения с одновременным повышением степени турбулизации и тепловой неоднородности факела наблюдается у образцов с наибольшим содержанием в смеси горючего (см. рис. 4). По мере повышения содержания в составе композиции окислителя, как показывают кадры из прямой киносъемки, происходит отчетливое сглаживание рельефа поверхности горения.



Рис. 3. Интерферограмма процесса горения модельной смеси (30% полимеризованного углеводородного горючего, 70% перхлората аммония) с дисперсностью окислителя $80 \cdot 10^{-5}$ м.

Представляет интерес сравнительный анализ процесса горения композиций, которые при прочих равных условиях характеризовались бы по возможности существенными различиями в уровне значений скоростей горения. Последнее осуществлено в настоящей работе вводом в состав вулканизированного каучука (горючее) различных количеств одной из ферроценовых присадок при сохранении постоянным соотношения окислитель — горючее и дисперсности окислителя. Соответствующие данные приведены на рис. 5.

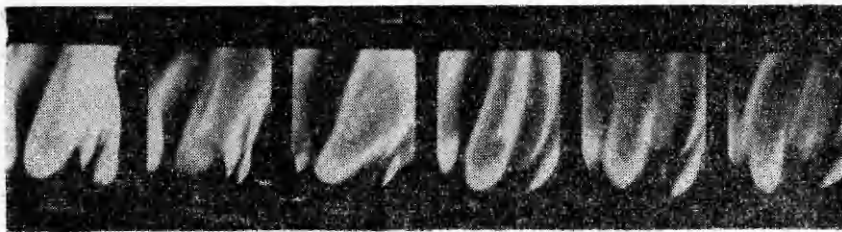


Рис. 4. Кинограммы процесса горения модельной смеси, состоящей из 55% полимеризованного углеводородного горючего и 45% перхлората аммония (средний размер частиц $3 \cdot 10^{-5}$ м).

Образцы *a* и *б* имели при этом скорости горения $0,5$ и $5,0 \cdot 10^{-3}$ м/с соответственно.

Из анализа приведенных на рис. 5 снимков следует, что по мере повышения скорости горения исследуемой смеси диспергирование проявляется все более отчетливо, причем у образца с наибольшей скоростью горения степень диспергирования максимальна. Об этом же свидетельствуют и интерферограммы процесса горения образцов, характеризующие, как уже отмечалось, уровень тепловых неоднородностей в факеле пламени. Качественный анализ полученных данных показывает, что в случае слабодиспергирующего образца (см. рис. 5, *a*) интерференционная картина факела, по существу, не искажена. С вводом в состав композиции ферроценовой присадки и повы-

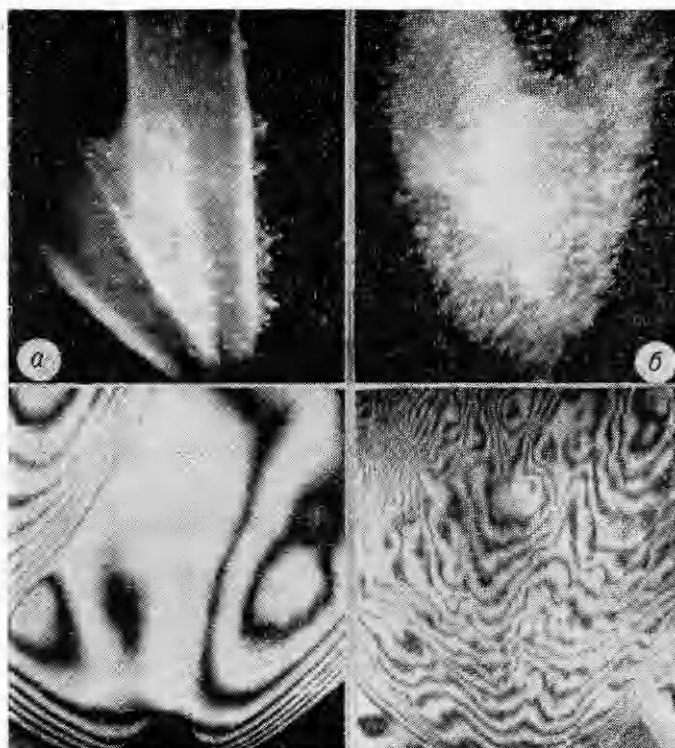


Рис. 5. Кинограммы и интерферограммы процесса горения модельных смесей с различной скоростью горения (20% полимеризованного углеводородного горючего в сочетании с ферроценовой присадкой, 65% перхлората аммония, 15% алюминия).

a — исходный образец; *б* — 7% присадки.

шением ее содержания, что приводит к повышению скорости горения до вышеназванного уровня, стационарность интерференционной картины нарушается. Это может быть вызвано хаотическим изменением поля температур и концентраций в факеле горящего образца, обусловленного беспорядочным движением реагирующих по высоте пламени диспергированных частиц. Именно с этим может быть связано наблюдаемое повышение турбулизации пламени.

Результатом процесса диспергирования является, по-видимому, также возникновение в факеле пламени зоны неравновесной ионизации. Так, в работе [10] показано, что в отличие от баллиститных порохов при горении смесевых композиций на основе перхлората аммония неравновесная ионизация наблюдается по всему объему пламени, включая реакционный слой к-фазы. Существенно, что последнее проявляется как при пониженных, так и при повышенных давлениях. Это подтверждает сделанный вывод о высокой интенсивности процесса диспергирования, так как свидетельствует о высокой концентрации движущихся дисперсионных частиц во всем объеме факела, в которых протекают однотипные реакции. В противном случае неравновесная ионизация не была бы равномерно распределена по всему объему факела.

Оценочный анализ диспергированных частиц по размерам показывает, что у образцов медленногорящих композиций диспергируемые частицы весьма неоднородны по размерам ($5 \div 15 \cdot 10^{-4}$ м). В то же время дисперсная фаза, образующаяся при горении быстрогорящих смесей, значительно более однородна и характеризуется, в среднем, заметно меньшим размером индивидуальных частиц. Ориентировочное значение размеров диспергируемых частиц и соответствующие значения скоростей горения рассматриваемых образцов показаны ниже.

Скорость горения, м/с ($p = 10^5$ Н/м ²)	Средний размер дисперсной фазы, м
$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$2,9 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
$0,5 \cdot 10^{-3}$	$10,0 \cdot 10^{-4}$

Как следует из данных рис. 2—5, в зоне, прилегающей к поверхности горения, наблюдается довольно отчетливая неравномерность поля скоростей движения диспергированных частиц. Последняя максимальна непосредственно у поверхности горящего образца, причем по мере повышения скоростей горения образца скорость движения индивидуальной диспергированной частицы также возрастает. Об этом свидетельствует тот факт, что при заданной скорости съемки (100 кадр/с) область проявления в этой зоне неразрешенных треков движущихся частиц оказывается заметно большей. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что процесс диспергирования является одним из важных факторов, сопровождающих процесс горения конденсированных систем смесевых типа. Можно, видимо, полагать, что максимальный размер диспергированных частиц соответствует глубине реакционного слоя к-фазы каждой конкретной композиции.

С учетом данных [1, 2, 6, 10] результаты выполненного анализа позволяют предположить, что в общей совокупности процессов превращения вещества при горении конденсированных систем смесевых типа определяющая роль принадлежит экзотермическому процессу превращения вещества непосредственно в реакционном слое к-фазы. Степень же реализации этого процесса в названной зоне определяется интенсивностью сопутствующего ему (в реальных условиях, видимо, всегда) процесса диспергирования.

Поступила в редакцию
30/XII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил.— В сб.: Физика взрыва, № 2. М., Изд-во АН СССР, 1963.
2. П. Ф. Похил, М. М. Белов.— В сб.: Физика взрыва, № 5. М., Изд-во АН СССР, 1956.
3. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
4. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1966.
5. П. Ф. Похил, И. О. Нефедова, А. Д. Марголин. Докл. АН СССР, 1962, 137, 860.
6. А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1960, 135, 1439.
7. Э. Н. Максимов, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1964, 157, 412.
8. Э. Н. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1966, 2, 1, 48.
9. Б. И. Хайкин, А. К. Филоненко и др. ФГВ, 1973, 9, 2, 169.
10. В. С. Логачев, А. С. Дмитриев, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1972, 199, 646.
11. М. П. Михеев. Интерферометры сдвига. Чебоксары, Изд. ЧГУ, 1971.
12. В. М. Верхунов, Н. Н. Максимов. ИФЖ, 1972, XXII, 2, 267.

УДК 566.468+532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ГАЗООБРАЗНОМ ОКИСЛИТЕЛЕ

В. И. Розенбанд, В. А. Чичев, Л. Ф. Афанасьева
(Черноголовка)

Реакции взаимодействия переходных тугоплавких металлов с газообразным окислителем имеют большое научное и прикладное значение. Представляет интерес изучение воспламенения прессованных таблеток тугоплавких металлов. Этот интерес обусловлен тем, что прессованные таблетки по физическим свойствам являются промежуточным звеном между порошками и монолитами соответствующих металлов. Сохраняя такие свойства порошкообразных веществ как пористость, большую поверхность реакции, прессованные таблетки обладают свойствами, которые присущи монолитам: определенной формой, объемом, твердостью. Имеется возможность изменять эти параметры в желаемом направлении.

Интерес к изучению воспламенения таблеток металлов в газообразном окислителе обусловлен также применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1, 2] тугоплавких неорганических соединений (получение нитридов, карбидов и т. д.).

Имеющиеся работы по исследованию воспламенения металлов [3—5] в основном связаны с вопросами техники безопасности, а целенаправленного изучения свойств прессованного образца и окружающей среды на закономерности воспламенения в них не проводилось.

Данная работа посвящена изучению закономерностей воспламенения в газообразном окислителе таблеток переходных металлов IV-A подгруппы: циркония, титана и гафния.

Применяли следующую методику эксперимента. Образцы для исследования диаметром 10 мм запрессовывались в асбоцементную вставку заподлицо с ее нижним торцом. Это исключало контакт боковой и задней поверхности образца с окислителем и одновременно уменьшало подвод тепла к боковой поверхности за счет кондуктивной теплопередачи и излучения. С помощью пружинного устройства образец быстро вводился в герметическую камеру, заполненную газообразным окислителем, нагретым до определенной температуры. Температура газа