

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

СПИНОВОЕ ГОРЕНИЕ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Ю. М. Максимов, А. Т. Пак, Г. В. Лавренчук,
Ю. С. Найбороденко, А. Г. Мержанов

(Томск)

В ряде случаев при горении металлов в азоте наблюдается спиновой режим горения, при котором очаг химической реакции, двигаясь по боковой поверхности образца, описывает спираль [1—3]. Реакцией в этом случае схвачен лишь приповерхностный слой образца. В [2] показано, что область реализации спинового горения лежит вблизи предела горения. Упрощенная математическая модель этого явления рассмотрена в [4], где показано, что спиновое горение есть результат проявления двумерной неустойчивости поверхностного горения. Из этой модели следует, что спиновой режим может иметь место и при безгазовом горении.

В данной работе приводятся экспериментальные результаты по спиновому горению безгазовых систем, когда волна горения, распространяясь по спирали, охватывает и внутренние области образца. Изучалось горение прессованных смесей порошков титана с ферробором и титана с алюминием. Использовались порошки титана марки ПТЭМ-1 фракции 50 мкм, алюминия АСД-4 и ферробора фракции 50 мкм (ферробор представлял собой сплав с массовым содержанием железа 50%).

Эксперименты проводились в бомбе постоянного давления в различных средах: гелии, аргоне высокой частоты и вакууме $1-10^{-1}$ мм рт. ст. При исследовании системы Ti—Al готовились смеси, соответствующие стехиометрическому составу (Ti—36,03%), из которых прессовались цилиндрические образцы диаметром 10 мм с относительной плотностью 0,6. Поскольку горение системы Ti—Al осуществляется лишь с предварительным подогревом, то перед воспламенением образцы подогревались в электрической печи, помещенной в бомбу постоянного давления. Температура подогрева регистрировалась хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-4.

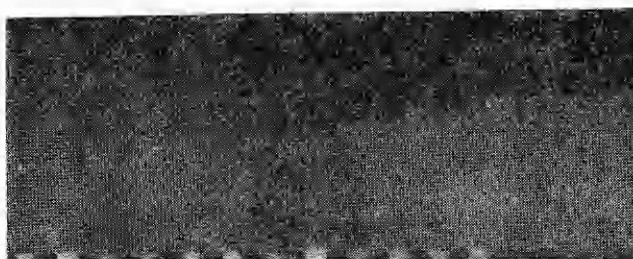


Рис. 1. Фоторегистрация спинового горения.

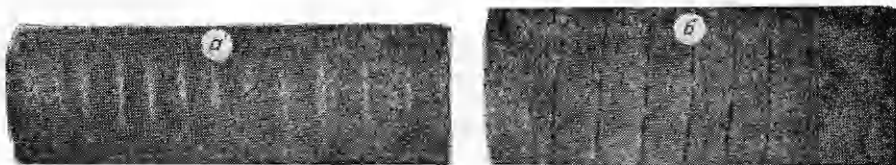


Рис. 2. Внешний вид образцов Ti—FeB (а) и Ti—Al (б).

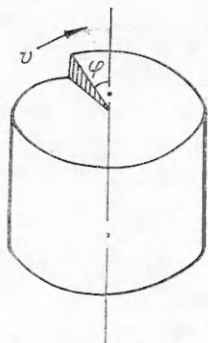


Рис. 3. Схематическое изображение движения зоны химической реакции (v — направление движения фронта химической реакции по образцу).

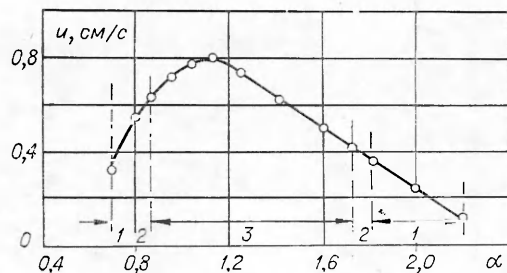


Рис. 4. Зависимость скорости горения от соотношения реагентов в смеси.

1 — область спинового горения; 2 — область пульсирующего горения; 3 — область стационарного горения.

Горение образцов системы Ti—FeV (диаметр образцов 10 и 20 мм, относительная плотность 0,7) различного состава осуществлялось в вакууме 10^{-1} мм рт. ст. Перед вакуумированием бомба предварительно продувалась гелием. Образцы воспламенялись поджигающей таблеткой из смеси титана с бором, которая поджигалась спиралью. Скорость горения измерялась с помощью фоторегистратора ФР-14. После горения проводились рентгенофазный (дифрактометр ДРОН-2) и металлографический (ПМТ-3) анализы.

Внешне картина спигового горения безгазовых систем не отличается от спигового горения системы металл — азот. Так же как и в [2], на боковой поверхности возникает светящееся пятно, которое, двигаясь по спирали, оставляет за собой яркий след (рис. 1).

Однако в отличие от [2] на сгоревших образцах отчетливо видна винтовая линия с постоянным шагом винта — след от прохождения химической реакции (рис. 2). Причем поверхность цилиндрических образцов приобретает характерный волнистый вид (в большей степени для образцов системы Ti—FeV), при котором наблюдается чередование гребней и впадин. В данном случае реакция идет в отличие от [2] не только по поверхности, но и в объеме образца. Как показали детальные металлографические исследования сгоревших образцов, геометрически область превращения конечных продуктов представляет собой спирально закрученную плоскость. Такая картина получается в результате винтового движения зоны химической реакции с осью вращения, проходящей через центр образца. На рис. 3 приведено схематическое изображение распространения фронта химической реакции. Фронт горения (заштрихованная область) расположен под некоторым углом φ к направлению распространения горения. Вращение такой площадки и образует характерный для спина винтовой след на поверхности образца. При экспериментальном изучении спигового горения в системе Ti—FeV исследовалось влияние соотношения компонентов, а в системе Ti—Al — начальной температуры T_0 на пределы горения.

Изучение системы Ti—FeV показало, что спин реализуется на пределе распространения фронта химической реакции, причем ему всегда предшествует пульсирующий режим. Как видно из рис. 4, спиновое горение оказалось возможным при соотношении реагентов в интервале $\alpha_1=0,69-0,80$ и $\alpha_2=1,80-2,20$, где α — отношение массы Ti к массе FeV (стехиометрическое значение $\alpha=1,09$). Частота вращения фронта горения постоянна и равна соответственно $\nu_1=1,6 \text{ с}^{-1}$ и $\nu_2=1,0 \text{ с}^{-1}$, а шаг винта $h_1=1,5 \text{ мм}$ и $h_2=2,5 \text{ мм}$. Угол наклона φ с увеличением угловой скорости изменился от $\varphi_1=73^\circ$ до $\varphi_2=80^\circ$. Рост диаметра образцов до 20 мм не привел к заметному изменению границ области спигового горения.

Металлографический анализ сгоревших с различной частотой образцов (рис. 5) показал, что в сечении наблюдается чередование светлых и темных участков. Светлые

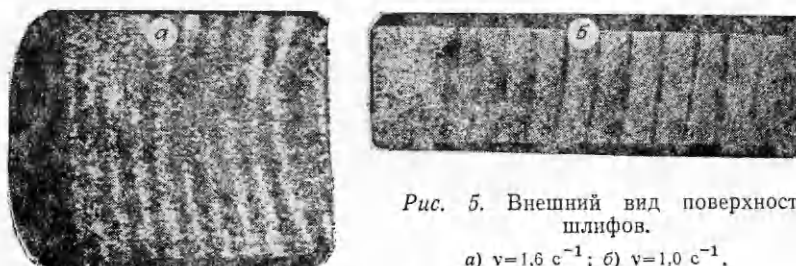


Рис. 5. Внешний вид поверхности шлифов.

а) $\nu=1,6 \text{ с}^{-1}$; б) $\nu=1,0 \text{ с}^{-1}$.

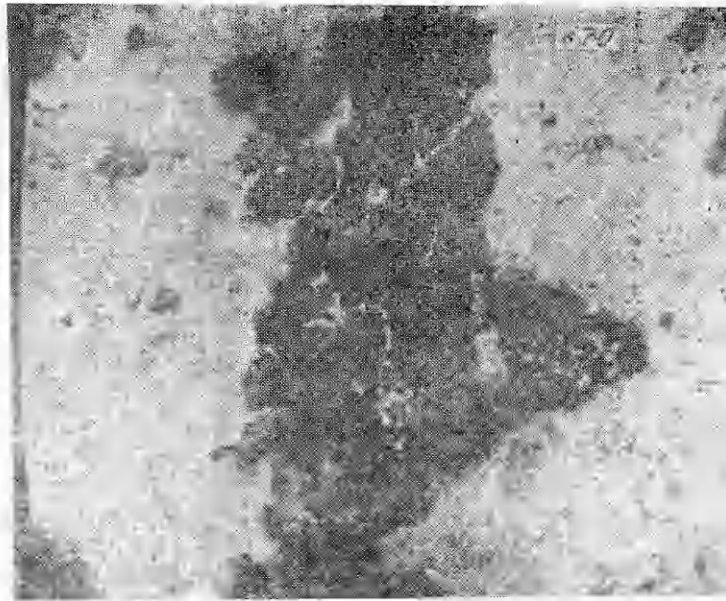


Рис. 6. Микрофотография участка поверхности шлифа.

(более сплавленные) области соответствуют местам прохождения фронта химической реакции, а темные (более пористые) — границам раздела между витками. На рис. 6 приведена микрофотография границы раздела областей. Микротвердости светлых и темных участков соответственно равны 1800 и 700 кг/мм². По данным рентгенофазного анализа продукт горения в светлых областях состоит в основном из боридов титана: TiB и TiB₂, а также чистого титана, железа и FeTi. Продукт горения пористых областей имеет в основном тот же фазовый состав. Соотношение фаз в продукте меняется в сторону увеличения свободного титана.

Для системы Ti—Al спиновый режим горения также реализуется на пределе горения. Так, при $T_0=120^\circ\text{C}$ и выше в вакууме фронт горения распространяется стационарно. Переход от стационарного горения к спиновому происходит в интервале температур подогрева $120\div 50^\circ\text{C}$. При $T_0=100^\circ\text{C}$ образец горит стационарно, а затем происходит переход к спиральному фронту (наблюдается 2—3 витка). При $T_0=70^\circ\text{C}$ фронт горения проходит по спирали почти по всей длине образца (наблюдается 7—8 витков). При $T_0<50^\circ\text{C}$ фронт не инициируется или погасает.

Иницирование образцов того же состава в атмосфере гелия показало, что спиновое горение наблюдается в интервале начальных температур $100\div 200^\circ\text{C}$. При $T_0\geq 200^\circ\text{C}$ фронт горения распространяется стационарно, а при $T_0\leq 100^\circ\text{C}$ образцы не горят. В среде аргона спиновое горение наблюдается при $T_0=150^\circ\text{C}$. Сгоревшие образцы во всех случаях несколько увеличиваются в диаметре, а по высоте удлиняются на 10—14%. В некоторых случаях образуются трещины.

Рентгеноструктурные исследования показали, что фазовый состав образцов, горевших в стационарном режиме, близок к алюминиду титана. Продукт же спинового горения, кроме линий алюминид титана, содержит еще дополнительные линии, соответствующие, по-видимому, фазам, богатым титаном. Следовательно, степень превращения при спиновом горении оказывается меньше, чем при стационарном режиме горения.

Таким образом, на безгазовых системах возможно спиновое распространение фронта горения. Зона реакции в этом случае представляет собой не точку, а луч, закручивающийся по спирали. Для объяснения природы спинового горения может быть использована качественная картина, предложенная в [4]. При пульсирующем горении в момент депрессии зоне реакции благоприятней развиваться в поперечном направлении относительно вектора средней скорости горения, поскольку здесь более высокая температура и практически непрореагировавшая исходная среда. Однако такое объяснение не отвечает на вопрос, почему спиновый режим горения наблюдается не на всех безгазовых системах. По-видимому, возникновение спина в таких системах зависит как от кинетических, так и структурных факторов, выяснение роли которых требует более детальных исследований.

Поступила в редакцию
28/VI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4, 892.
2. А. К. Филоненко, В. И. Вершинников. ФГВ, 1975, 11, 3, 353.
3. А. К. Филоненко.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Под ред. А. Г. Мержанова. Черноголовка, 1975.
4. Т. П. Ивлева, А. Г. Мержанов, К. Г. Шкадинский. Докл. АН СССР, 1978, 239, 5, 1086.

О ПОДВИЖНОСТИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПРИ ГОРЕНИИ ГРАФИТА

А. Г. Захаров, Б. С. Фиалков

(Караганда)

В [1, 2] показано, что в развитии ионизационных процессов, протекающих при нагреве, воспламенении и горении графита, наблюдаются три этапа, причем первый и третий связаны с преимущественной генерацией положительных ионов, а второй — отрицательных. После воспламенения с ростом температуры реакционного пространства также происходит смена полярности заряженных частиц.

Задача данной работы — измерение подвижности ионов, генерируемых при горении, и изучение влияния на нее температуры реакционного пространства. Определение подвижности проводилось путем сравнения скорости, приобретенной ионами в поле, со скоростью струи газа, сносящей их [3].

Экспериментальная установка состояла из цилиндрического конденсатора, внешней обкладкой которого служила металлическая труба диаметром 20 мм, а внутренней — цилиндрический образец графита диаметром 5 и длиной 20 мм. Между обкладками поддерживалась постоянная разность потенциалов $\Delta\varphi=100$ В. Ток, протекающий в газовом промежутке при стабильной температуре системы, фиксировался микроамперметром И-37 с параллельно подключенным одним из усилителей двухкоординатного самопишущего потенциометра ПДС-0.25. На второй его усилитель подавался сигнал с термоанемометра ЭА-2М, которым измерялась скорость газа в реакционном объеме. Образцы нагревались в потоке воздуха. Температура в ходе опытов изменялась от 400 до 1200°C. Образец воспламенялся при 780°C.

Очевидно, что в покоящемся воздухе определенная часть ионов, не успевшая прорекомбинировать в объеме, с зарядом того же знака, что и потенциал образца, дойдет до внешней обкладки и амперметром будет зафиксирован ток, пропорциональный их числу. При увеличении скорости потока газа суммарный вектор скорости ионов будет

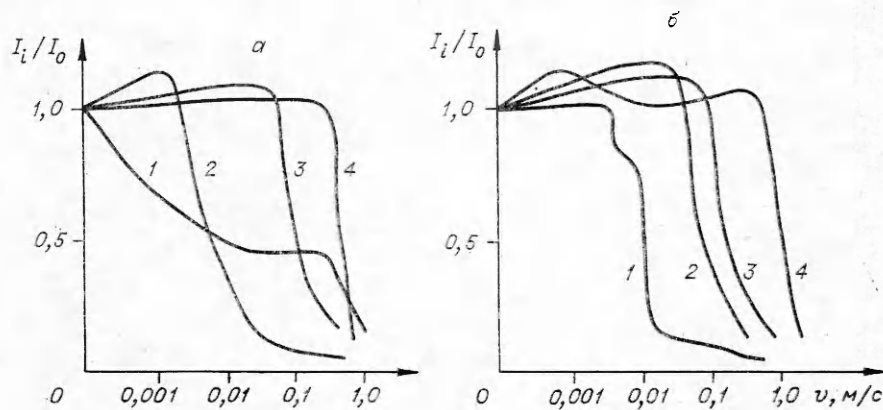


Рис. 1. Зависимость тока положительных (а) и отрицательных (б) ионов от скорости воздуха в реакционном пространстве.

а) T , °С: 1 — 1100—1200, 2 — 1000, 3 — 900, 4 — 800;
б) T , °С: 1 — 1200, 2 — 1000—1100, 3 — 900, 4 — 800.