

## СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.46

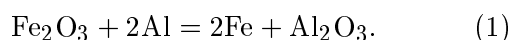
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ГОРЕНИИ  
ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВОГО ТЕРМИТАВ. С. Корогодов, А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, А. А. Трунов,  
Р. М. ГаббасовОтдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск  
maks@fisman.tomsk.ru

Зарегистрировано неравновесное СВЧ-излучение волны горения порошковой системы  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$  в диапазоне частот  $3.4 \div 37.5$  ГГц. Установлено, что мощность излучения пропорциональна площади свободной поверхности продуктов реакции и на  $4 \div 7$  порядков превышает уровень теплового излучения в том же интервале длин волн. Возможным механизмом электромагнитной эмиссии является тормозное излучение свободных электронов, испускаемых поверхностью конденсированных фаз.

Ключевые слова: горение, гетерогенная система, сверхвысокочастотное излучение.

Известно, что в волне горения гетерогенных систем Ni-Al, Co-S, FeO-TiO<sub>2</sub>-Al, Ti-Si и других, образующих конденсированные продукты, происходит ионизация газа, связанная с эмиссией электронов и ионов с поверхности конденсированных фаз [1-5]. В связи с особым характером ионизации данного типа систем, включающим участие прямого химического возбуждения заряженных частиц [3, 4], представляет интерес анализ СВЧ-излучения, характеризующего диссипативные процессы в плазме. Ранее это излучение фиксировалось при горении газов и органических твердых топлив [6], взрыве металлсодержащих смесей [7].

В настоящей работе объектом исследования являлась порошковая система  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$ , выбор которой обусловлен высокими значениями теплового эффекта, максимальной температуры горения (до 3 200 К [8]) и преимущественным протеканием реакции внутри конденсированных фаз, которая при стехиометрическом соотношении компонентов реализуется по схеме



При нормальном давлении частичное участие газа в процессе связано с кипением алю-

миния ( $T_b = 2\,793$  К [9]), разложением  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $T_d = 1\,835$  К [9]), газификацией легколетучих примесей и др.

Для проведения экспериментов готовили порошковые смеси алюминия АСД-4 и оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  марки ХЧ, из которых формировали образцы в виде диска толщиной около 10 мм. Горение инициировалось с помощью нагретой электрическим током проволоочной спирали в воздушной среде.

За счет газовыделения в ходе реакционного процесса происходит диспергирование образца с образованием облака взвеси. Согласно данным видеосъемки, на этапе горения смеси формируется высокотемпературное ядро облака, расширяющееся до диаметра  $D_m = (50 \div 150) \cdot 10^{-3}$  м, где, по-видимому, завершаются химические превращения системы. В дальнейшем ядро релаксирует с образованием зоны разброса остывающих частиц конечного продукта. Последний, как показывает рентгенофазовый анализ стехиометрического состава, представляет собой композицию Fe, FeO,  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ . Присутствие оксидных форм железа объясняется тем, что помимо окислительно-восстановительной схемы (1) в реакции частично участвует кислород атмосферы. Полное диспергирование образца на частицы размером  $(0.1 \div 0.5) \cdot 10^{-3}$  м реализуется при использовании составов  $(75 \div 70 \%) \text{Fe}_2\text{O}_3 + (25 \div 30 \%) \text{Al}$

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 05-03-32139) и фонда CRDF (грант TO-016-02).

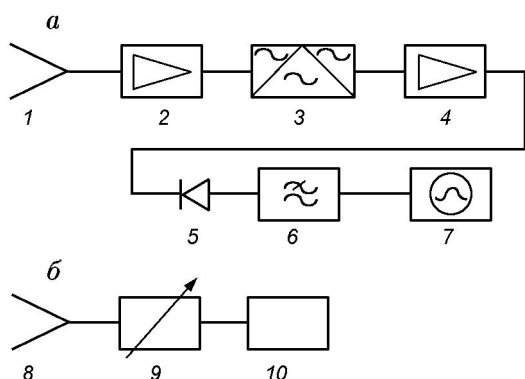


Рис. 1. Схема детекции измерений СВЧ-излучения волны горения:

*a* — измерительная система, *b* — калибровочная система; 1 — приемная рупорная антенна, 2 — СВЧ-усилитель, 3 — преобразователь частоты, 4 — усилитель промежуточной частоты, 5 — детекторная секция, 6 — фильтр нижних частот, 7 — запоминающий осциллограф, 8 — антенна, 9 — переменный аттенюатор, 10 — генератор стандартных сигналов

насыпной плотности, где в зависимости от массы смеси  $m = (1 \div 16) \cdot 10^{-3}$  кг стадии расширения и релаксации ядра облака протекают соответственно в интервалах времени  $0.12 \div 0.24$  и  $0.12 \div 0.08$  с, а средняя плотность взвеси  $m/D_m^3$  приблизительно составляет  $5 \div 8$  кг/м<sup>3</sup>.

Радиочастотное излучение СВЧ-диапазона регистрировали с помощью измерительной системы (рис. 1), включающей приемную рупорную антенну, СВЧ-усилитель, преобразователь частоты, усилитель промежуточной частоты, детекторную секцию, фильтр нижних частот и запоминающий осциллограф. Коэффициент усиления тракта составлял 80 дБ. Для калибровки системы на вход антенны 1 подавалось СВЧ-излучение, формируемое генератором стандартных сигналов типа Р2 и антенной 8. С помощью переменного аттенюатора типа Д5 определялась чувствительность измерительной системы, которая в условиях сближенной мощности излучения волны горения и генератора стандартных сигналов составила  $5 \cdot 10^{-5}$  Вт/В. Последняя измерялась в приближении отсутствия поляризации и совпадения телесного угла излучения с диаграммой направленности приемной антенны. Для исследований использовались сменные СВЧ-узлы 1, 2, 3, 8, что позволяло регистрировать излучение в поддиапазонах  $3.4 \div 4.2$ ,  $10.7 \div 12.7$  и  $35.5 \div 37.5$  ГГц. Расстояние между антенной и

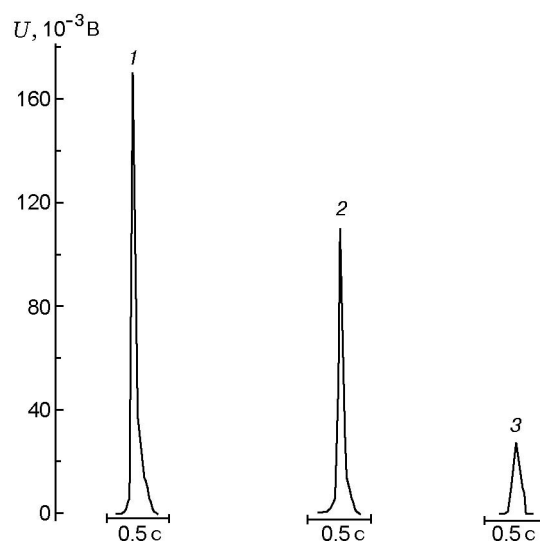


Рис. 2. Огибающая импульсного СВЧ-сигнала при горении стехиометрического состава  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ :

масса образца  $4 \cdot 10^{-3}$  кг; 1 — поддиапазон частот  $f = 3.4 \div 4.2$  ГГц, 2 —  $f = 10.7 \div 12.7$  ГГц, 3 —  $f = 35.5 \div 37.5$  ГГц

образцом 0.9 м, что более чем 10 раз превосходит длину волны  $(0.8 \div 8.8) \cdot 10^{-2}$  м и соответствует дальней зоне приема излучения.

Как показывают измерения, при горении системы  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}$  формируется импульсный СВЧ-сигнал в различных поддиапазонах частоты (рис. 2). Максимальная амплитуда и минимальная длительность сигнала ( $0.2 \div 0.3$  с) зарегистрированы для составов (75 ÷ 70 %)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + (25 \div 30)$  % Al насыпной плотности ( $\rho = 1.4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Сопоставление данных видеосъемки и осциллограмм свидетельствует о том, что длительность импульса совпадает со временем существования высокотемпературного ядра облака взвеси. Амплитуда сигнала сильно зависит от диспергирующей способности системы. Например, в случае прессованной до плотности  $\rho = 2.0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> стехиометрической смеси  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$  (74.7/25.3) взвесь практически не образуется в силу коалесценции расплавленных продуктов, которые в виде крупных капель остаются на месте образца. Сигнал от уплотненной смеси оказывается более чем в 10 раз меньше по сравнению с аналогичным составом насыпной плотности, где продукты полностью переходят во взвесь. Роль диспергирования объясняется пропорциональностью мощности излучения площади свободной поверхности продуктов реакции (*S*). Дей-

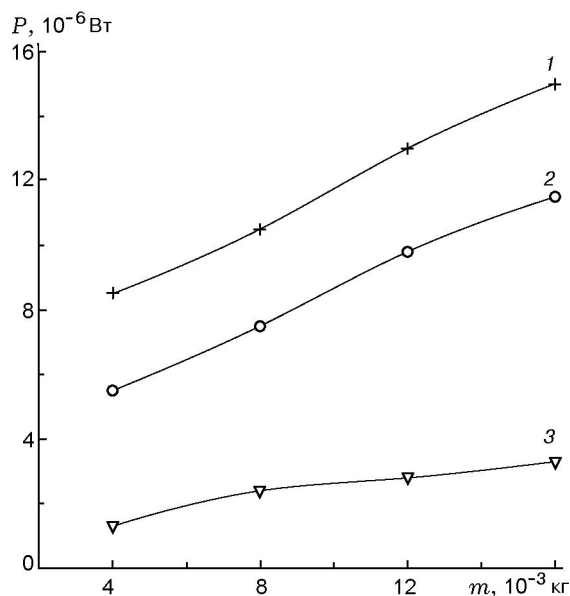


Рис. 3. Зависимость амплитудного значения мощности СВЧ-сигнала от массы образца при горении смеси стехиометрического состава  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}$ :

1 —  $f = 3.4 \div 4.2$  ГГц, 2 —  $f = 10.7 \div 12.7$  ГГц, 3 —  $f = 35.5 \div 37.5$  ГГц

ствительно, при отсутствии диспергирования в зависимости от массы образца величина  $S \approx (2 \div 20) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  близка к площади исходного образца, а в условиях полного диспергирования  $S \approx 6m/d\rho_c \approx (30 \div 500) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , где  $d \approx 0.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\rho_c \approx 6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  — соответственно средние значения диаметра и плотности частиц взвеси. В последнем случае наблюдается практически линейное возрастание мощности СВЧ-сигнала с увеличением массы образца (рис. 3) и, следовательно, повышением значения  $S$ .

Вероятным механизмом радиочастотной эмиссии волны горения является тормозное излучение свободных электронов, вызванное их столкновениями с ионами и нейтральными атомами газовой плазмы. Согласно [3, 4] источником электронов является поверхность конденсированных фаз, которая в момент физико-химических превращений выделяет заряженные частицы с энергетическим спектром до 150 эВ. Учитывая, что при нормальном давлении длина свободного пробега в газе не больше  $10^{-6} \text{ м}$ , тормозное излучение практически исходит от поверхности частиц продуктов реакции в зоне высокотемпературного ядра облака взвеси.

Необходимо отметить, что в указанных условиях измерений антенна принимает только часть СВЧ-излучения облака взвеси. В предположении изотропности излучения его интегральная мощность превышает измеренное значение в  $4\pi l^2/S_{eff} \approx 5 \cdot 10^2$  раз ( $l \approx 0.9 \text{ м}$  — расстояние от антенны до образца,  $S_{eff} \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  — эффективная площадь антенны) и, например, для образца массой  $16 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  может достигать  $(1 \div 8) \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ . Наблюдаемое излучение в значительной степени является неравновесным, и его мощность на  $4 \div 7$  порядков превышает предельный уровень теплового излучения продуктов горения в том же диапазоне длин волн, определяемый формулой Планка:

$$P \approx S \Delta \lambda \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{\exp(hc/k\lambda T) - 1},$$

где  $\lambda = (8.00, 2.60, 0.83) \cdot 10^{-2} \text{ м}$  и  $\Delta \lambda = (1.70, 0.40, 0.05) \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — соответственно средние значения и интервалы детектируемых длин волн,  $T \approx 3200 \text{ К}$  — максимальная температура горения;  $h$ ,  $k$  — постоянные Планка и Больцмана,  $c$  — скорость света.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kudryashov V. A., Mukasyan A. S., Filimonov I. A. Chemoionization waves in heterogeneous combustion processes // J. Mater. and Proces. 1996. V. 4, N 5. P. 353–358.
2. Максимов Ю. М., Кирдяшкин А. И., Корогодов В. С., Поляков В. Л. Генерация и перенос электрического заряда при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе на примере системы Co-S // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 130–133.
3. Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., Корогодов В. С., Поляков В. Л. Неравновесные электрофизические явления в процессах СВЧ // Докл. АН. 2001. Т. 381, № 1. С. 66–68.
4. Кирдяшкин А. И., Поляков В. Л., Максимов Ю. М., Корогодов В. С. Особенности электрических явлений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 2. С. 61–67.
5. Kamynina O. K., Kidin N. I., Kudryashov V. A., et al. Formation of low-temperature plasma during SHS process // Intern. J. Self-Propagating High-Temperature Synth. 2001. V. 10, N 1. P. 55–62.

6. Башаринов А. Е., Тучков Л. Т., Поляков В. М., Ананов Н. И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ-диапазоне. М.: Сов. радио, 1968.
7. Борисов А. А., Сумской С. И., Комиссаров П. В. и др. Электрические и эмиссионные свойства продуктов взрыва тугоплавких гетерогенных взрывчатых смесей // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 11. С. 52–63.
8. Новиков Н. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1975. С. 174–187.
9. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина и др. М.: Энергоатомиздат, 1991.

*Поступила в редакцию 5/IV 2005 г.*

---