

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КОРОТКОВОЛНОВОГО ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА РЕАКЦИЙ СВС

В.Г. Саламатов<sup>1</sup>, А.И. Кирдяшкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>Томский научный центр СО РАН, Томск, Россия.

\* [Salamvit@yandex.ru](mailto:Salamvit@yandex.ru)

Изучены высокотемпературные процессы горения порошковой смеси  $\text{MoO}_3\text{-Al}$  (время горения  $0.3\div 0.4\text{ms}$ ) и реакции ламинатных композитов  $\text{Ti-B}$ ,  $\text{Ti-Si}$ , вынуждаемые импульсным лазерным воздействием (время воздействия  $0.5\mu\text{s}$ ). Методом фотографической фотометрии установлено, что коротковолновый эмиссионный спектр исследуемых процессов простирается вплоть до мягкого рентгеновского диапазона длин волн (менее  $0.6\text{nm}$ ). Обсужден вероятный механизм возбуждения рентгеновского излучения.

Быстропротекающие реакции горения газовых и конденсированных систем при температуре  $1500\div 2000\text{K}$  и более относятся к числу значимых для практики химических процессов, широко применяемых в современной энергетике, металлургии и ракетной технике [1, 2]. Одним из методов динамического контроля горения является анализ спектра электромагнитного излучения реагирующих систем, что позволяет получать важную информацию о кинетике превращений, текущем составе и температуре продуктов. Согласно существующим представлениям, излучение имеет хемилюминесцентную или термическую природу, при этом граница эмиссионного спектра, в области коротких длин волн определяется величиной максимальной энергии возбуждения молекул. Хемилюминесценция происходит за счет прямого возбуждения молекул порциями энергии, высвобождаемой в ходе образования новых химических связей.

В экспериментальных исследованиях углеводородных, металлосодержащих и других пламен коротковолновую границу эмиссионного спектра обычно детектируют в интервале  $\lambda^*\approx 250\div 500\text{nm}$  [3, 4]. Относительно недавно [5, 6] при горении и тепловом взрыве порошковой смеси  $\text{Ti-B}$  обнаружен рентгеновский эмиссионный спектр (диапазон энергии фотонов  $17\text{keV}\div 1.25\text{MeV}$ ). Горение системы характеризуется высокой температурой

(более 3000 K), преимущественным химическим превращением системы внутри конденсированных фаз, высокой плотностью энерговыделений (более 0.1MW/cm<sup>3</sup>). Последний параметр (на 3-4 порядка) превосходит обычные газовые пламена. Рентгеновское излучение при горении смеси Ti-B трудно объяснить с позиции известных механизмов термического и хемилюминесцентного возбуждения веществ. Его присутствие означает, что реакционный процесс сопровождается каким-то синергетическим эффектом концентрирования выделяющейся энергии на атомных состояниях системы. К проявлению этого эффекта можно отнести сильно неравновесное возбуждение эмиссионной плазмы горения, наблюдаемое в системе Ti-Si [7].

В настоящей работе (методом фотографической фотометрии с использованием фотометрического пакета, состоящего из фотопленки RAR2497 и окружающих защитных слоев) излучение рентгеновского диапазона детектировали при горении порошковой смеси MoO<sub>3</sub>-Al, инициируемой электро-спиралью. А так же, в реакциях ламинатных композитов Ti-B, Ti-Si, вынуждаемых импульсным воздействием луча лазера длины волн – 2.7÷3.1μm; длительность импульса – 0,5 μs; энергия импульса – 0.6 J; средняя энергетическая освещенность участка на образце в течение импульса - (5÷10)·10<sup>6</sup> W/cm<sup>2</sup>.. Величину почернения фотопленки вычисляли по формуле:  $S=|\lg(J/J_0)|$ , где  $J$ ,  $J_0$  – соответственно яркости почерненных и непочерненных участков изображения в условных единицах.

**Система MoO<sub>3</sub>-Al.** Для защиты фотопленки использовались слои - черная бумага (100 мкм), фольга сплава Be-Al (50 мкм). Как показали исследования, горение смеси MoO<sub>3</sub>-Al реализуется в пределах интервала времени 0.3÷0.4ms и сопровождается формированием высокотемпературного облака взвеси частиц (размер 1÷50μm) продуктов реакций (композиция фаз Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mo-MoO<sub>2</sub>). В ходе процесса происходит почернение фотопленки до величины S=0.86. Контур почернения близки к геометрической форме зоны соприкосновения облака с внешней поверхностью фотометрического пакета (рисунок 1).

**Система Ti-B и Ti-Si.** Здесь титановую фольгу с покрытиями B, Si использовали в качестве внешнего слоя защитного пакета для фотопленки, которая была помещена в конверт из черной бумаги (100 мкм). На поверхности ламинатных композитов Ti-B, Ti-Si при лазерной обработке наблюдается их приповерхностное плавление с развитием конвективных течений и капиллярных микроволн в образующихся расплавах. В ходе

лазерной обработки композитов происходило почернение фотопленки до величины  $S=0.2$  (Ti-B),  $S=0.54$  (Ti-Si). Контуры областей почернения близки к геометрической форме зон лазерного воздействия. В отсутствие химических превращений композитов (лазерная обработка титановых фольг без покрытий или композитов с толстыми покрытиями) почернения фотопленки не возникало.

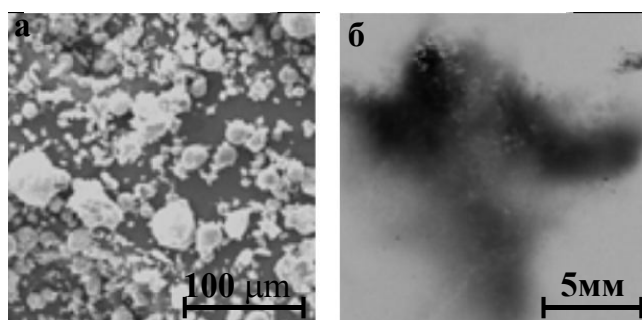


Рисунок 1. Морфология конденсированных продуктов реакции (а) и почернение фотопленки (б) при горении смеси  $\text{MoO}_3+22\text{wt.}\%\text{Al}$ .

Наблюдаемая в экспериментах засветка фотопленок свидетельствует о рентгеновском излучении реагирующих систем в ходе горения смеси  $\text{MoO}_3\text{-Al}$  и вынужденных гетерогенных реакций ламинатных композитов Ti-B, Ti-Si.

Если принять в качестве порога проникновения фотонов через применяемые защитные слои (черная бумага, сплава Be-Al) величину коэффициента трансмиссии  $10^{-4}$ , то из оценки реальных трансмиссионных характеристик слоев на основе данных [8] следует, что в потоке излучения реагирующих систем присутствуют фотоны с энергией более 1000 eV и длиной волны менее 1.2nm. В принципе засветка фотопленки может быть также результатом воздействия потока электронов или атомных частиц. Однако фотоны отличаются лучшей проникающей способностью и их эффект более вероятен.

## Литература

- [1] H Belal, W Chang, I. E Gunduz et. al., *Combustion and Flame*, 194, (2018) 410
- [2] E. A. Levashov, A. S. Mukasyan et. al, *J. Int. Mater. Rev.*, 62, (2017) 203
- [3] V.V. Azharonok, L.E. Kratsko, N.I. Chubryk et. al, *J. Appl. Spectroscop*, 78, (2012) 763
- [4] M. Sooa, S. Goroshin, N. Glumac et. al, *Combust. Flame*, 180, (2017) 230
- [5] A.I. Kirdyashkin, V.G. Salamatov et. al, *Combust. Explos. Shock Waves*, 44, (2008), 729
- [6] A.I. Kirdyashkin, V.G. Salamatov, et. al, *Doklady Phys. Chemistry*, 454, (2014) 5
- [7] O.K. Kamynina, N.I. Kidin, V.A. et. al, *Int. J. Self-Propag. High-Temp.Synth*, 10, (2001), 55
- [8] B.L. Henke, E.M. et. al., *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 54, (1993), 181