

СРОЧНОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 536.46;541.135.4

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

А. И. Кирдяшкин¹, В. Г. Саламатов¹, Ю. М. Максимов¹, Э. А. Соснин²,
В. Ф. Тарасенко², Р. М. Габбасов¹¹Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск
maks@fisman.tomsk.ru²Институт сильноточной электроники СО РАН, 634066 Томск, badik@loi.hcei.tsc.ru

Проведено исследование эмиссионных эффектов гетерогенного горения в области ионизирующего излучения. На примере порошковой системы Ti—В показано, что протекание самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в режиме теплового взрыва сопровождается «мягким» рентгеновским излучением с оценочной энергией квантов ≈ 5 кэВ.

Ключевые слова: гетерогенное горение, рентгеновское излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Спецификой процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является повышенный уровень плотности химической энергии, диссипируемой реакционной волной в единицу времени (более 10^{13} Вт/м³). По данному параметру СВС на 3 ÷ 4 порядка превосходит газовые пламена и приближается к детонационным явлениям. Согласно работам [1, 2] горение систем Ni—Al, Ti—C, Mo—В и других сопровождается генерацией газовой плазмы с высокой концентрацией заряженных частиц (до 10^{22} м⁻³), потока «горячих» электронов с энергетическим спектром до 150 эВ, радиочастотного излучения СВЧ-диапазона и другими неравновесными эмиссионными эффектами. Последние характеризуют диссипативные явления системы (экзоэмиссия электронов и ионов со свободной поверхности конденсированных фаз, тормозное излучение электронов плазмы и др.), стимулированные реакционным процессом. В исследованиях [3] показано, что в ходе теплового взрыва систем Ni—Al, Ti—В возникает интенсивное оптическое излучение в ультрафиолетовом диапазоне 200 ÷ 400 нм, которое по мощности сопоставимо с тепловым спектром. Эмиссия ультрафиолета реализуется

на начальных этапах процесса в течение интервала времени (до 50 мс), близкого к характерному времени химического превращения системы. На дальнейших этапах система излучает лишь тепловой спектр.

Настоящая работа посвящена анализу энергетических пределов эмиссионных эффектов СВС в области ионизирующего излучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовалась порошковая система Ti—В. Смесь порошков титана (ПТМ) и бора аморфного черного (98 % чистоты) готовилась в массовом соотношении Ti + 31.1 % В. Размер частиц Ti меньше 60 мкм, В — не больше 1 мкм. Для удаления влаги и легколетучих примесей компоненты предварительно подвергались термовакуумной обработке при температуре 820 К (Ti), 1120 К (В) и давлении 10^{-2} Па. Смесь насыпной плотности массой 0.5 г помещалась в цилиндрическую кварцевую кювету диаметром 18 мм, размещенную на поверхности молибденовой фольги. Инициирование реакции СВС проводилось в вакуумной камере в среде аргона при давлении 70 ÷ 100 Па путем медленного нагрева фольги электрическим током до 1100 ÷ 1200 К в течение 1 ÷ 3 мин. Реакция протекала в режиме теплового взрыва. Упрощенная схема химической конвертации смеси представляется в виде $Ti + 2B \rightarrow TiB_2 + 293$ кДж/моль.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-03-0032).

Ионизирующее излучение (за пределами оптического диапазона) регистрировали по засветке рентгеновской фотопленки РФ-3, а также с помощью рентгеновского дозиметра Argow-Tech, Inc (Model 138). Для предотвращения воздействия оптического излучения фотопленку помещали в светонепроницаемый конверт из плотной черной бумаги. На поверхности фотопленки в ряде экспериментов устанавливалась пластиковая пластина толщиной 120 мкм, которая экранировала часть поверхности фотопленки. Фотоизмерительная сборка (фотопленка, поглотительная пластина, конверт) и дозиметр помещались в верхней части вакуумной камеры на расстоянии 25 см над поверхностью образца порошковой смеси (рис. 1). Указанные методы регистрации рентгена ранее были апробированы в работах [4, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывают исследования, за счет потока газовыделений (газификация примесей, частичное испарение основных компонентов) в ходе теплового взрыва образуется излучающее облако взвеси радиусом до 20 см, состоящее из капель конденсированного продукта размером $10 \div 200$ мкм и ионизированного газа. С учетом данных [6] формирование капель происходит, по-видимому, путем коалесценции расплавленных исходных частиц смеси на начальном эта-

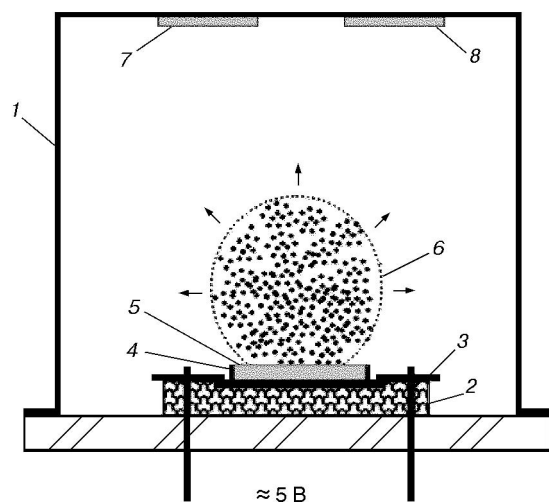


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — вакуумная камера, 2 — диэлектрическая подложка, 3 — молибденовая фольга, 4 — кварцевая кювета, 5 — исходная смесь, 6 — облако взвеси, 7 — дозиметр, 8 — фотоизмерительная сборка

пе реакции с последующим развитием химического взаимодействия Ti и В внутри капель на стадии образования облака. Интегральное время протекания процесса, фиксируемого по наличию оптического излучения, не превышало 0.1 с.

Как показали исследования, реакционный процесс сопровождается излучением рентгеновского диапазона. Регистрируемая на дозиметре суммарная экспозиционная доза излучения достигала 10 мР в серии из 24 взрывов. Дозы излучения в отдельных взрывах значительно различаются с достижением уровня 2.5 мР. Отметим, что регистрируемая экспозиционная доза не изменялась при защите дозиметра от радиочастотного излучения пленкой из алюминия толщиной 3 мкм.

Характер засветки фотопленки свидетельствует о наличии «мягкого» рентгеновского излучения. Как видно из рис. 2, излучение проникает через конверт толщиной 80 мкм, но задерживается двойным слоем из бумаги (80 мкм) и поглощающей пластиковой пластины (120 мкм). Здесь область почернения фотопленки ограничена контурами пластиковой пластины, размещенной на пленке. В случае использования конверта толщиной 130 мкм засветка пленки не фиксировалась. Оценки, проведенные в [5], показали, что при толщине конверта из черной бумаги 95 мкм должна происходить засветка пленки квантами рентгеновского излучения с энергией ≈ 5 кэВ. Учитывая, что поглощение излучения подчиняется извест-

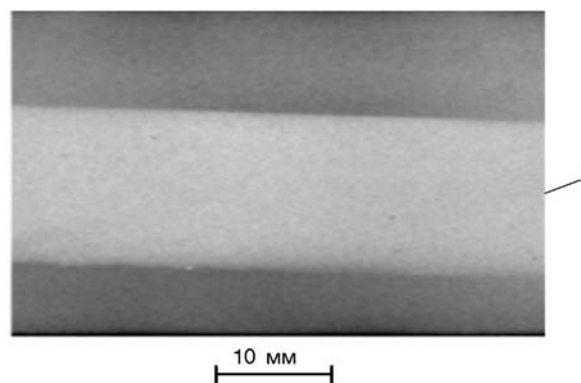


Рис. 2. Засветка фотопленки РФ-3 в результате воздействия рентгеновского излучения теплового взрыва системы Ti—В (1 — область тени, создаваемой поглощающей пластиковой пластиной)

ному соотношению $J = J_0 e^{-\mu t}$ (J_0 , J — интенсивности излучения до и после прохождения через слой вещества, t — толщина слоя, μ — линейный коэффициент поглощения), можно оценить энергию рентгеновских квантов. Для засветки пленки при толщине конверта 80 мкм их энергия должна быть не менее $3 \div 4$ кэВ, а при толщине конверта 130 мкм — более 7 кэВ; соответственно уровень энергии квантов излучения, вызывающих наблюдаемый эффект засветки фотопленки, должен быть ≈ 5 кэВ.

Полученные данные пока не позволяют составить четкое представление о механизме возникновения наблюдаемого рентгеновского излучения. Учитывая, что в процессе исследуемой реакции высвобождение химической энергии в среднем не превышает 1 эВ на один атом, необходимым условием генерации рентгеновских квантов с энергией 5 кэВ является наличие коллективных эффектов возбуждения с участием многоатомных образований конденсированных систем (например, кластеров, зародышей). Излучение может выходить непосредственно со свободной поверхности капель облака взвеси в процессе химической реакции, а также являться результатом торможения высокоэнергетических свободных электронов плазмы, которые ускоряются в местах локального усиления электрического поля. Выяснение природы ионизирующего излучения СВС требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

На примере горения порошковой системы Ti—В установлено наличие рентгеновского излучения при протекании СВС. Оценочная энергия квантов излучения достигает 5 кэВ.

Авторы выражают глубокую благодарность рентгенологам В. А. Гуйо, И. В. Маяковой, а также И. Д. Костыре за помощь и ценные советы при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корогодов В. С., Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., Трунов А. А., Габбасов Р. М. Сверхвысокочастотное излучение при горении железоалюминиевого термита // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 4. С. 132–135.
2. 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.
3. Кирдяшкин А. И., Саламатов В. Г., Габбасов Р. М., Максимов Ю. М., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. Особенности оптического излучения реакционных систем в процессе СВС // Материалы IV междунар. симпозиума «Горение и плазмохимия», Алматы, Казахстан, 12–14 сентября 2007. Алматы: Изд-во Казах. нац. ун-та им. Аль-Фараби, 2007. С. 56–58.
4. Костыря И. Д., Тарасенко В. Ф., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Объемное рентгеновское излучение в газовых диодах при атмосферном давлении // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 7. С. 79–86.
5. Костыря И. Д., Тарасенко В. Ф., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Рентгеновское излучение при формировании объемных разрядов наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления // ЖТФ. 2006. Т. 76, вып. 3. С. 64–69.
6. Кирдяшкин А. И., Китлер В. Д., Саламатов В. Г., Юсупов Р. А., Максимов Ю. М. Капиллярные гидродинамические явления в процессе безгазового горения // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 6. С. 31–39.

Поступила в редакцию 3/IX 2008 г.