

## ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ АКТИВАЦИЯ СВС-ПРОЦЕССА В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ

А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, В. Д. Китлер,  
В. В. Буркин\*, В. С. Седой\*\*

Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, 634021 Томск

\*НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете,  
634050 Томск

\*\*Институт сильноточной электроники СО РАН, 634021 Томск

На примере системы Ni–Al изучено влияние частотной электроимпульсной обработки на протекание реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в порошковой смеси. Использовалось продольное направление прикладываемого к образцу электрического поля и электрического тока по отношению к направлению распространения волны горения. Установлено, что под действием электрообработки линейная скорость горения увеличивается в  $1,3 \div 1,6$  раза, трансформируется структура, увеличивается полнота химического превращения. Показано, что наблюдаемые эффекты имеют нетепловую природу.

Ранее установлено, что использование внешних физических полей оказывает существенное влияние на протекание реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и на формирование продуктов взаимодействия [1, 2]. Дополнительные возможности для стимулирования гетерогенных процессов в порошковых системах дает применение электрического поля. Результаты изучения спекания порошков металлов, сплавов, химических соединений показывают, что под действием электрического тока происходит сильное ускорение диффузионного и конвективного массопереноса между исходными частицами [3].

Начатые сравнительно недавно исследования процессов СВС в электрическом поле позволили установить, что пропускание постоянного и низкочастотного переменного тока через порошковые смеси интенсифицирует реакцию СВС, протекающую в режиме теплового взрыва [4] и в режиме послыонного горения [5]. Доминирующим фактором ускорения реакции здесь является выделение дополнительной джоулевой энергии и, как следствие, повышение температуры системы. Согласно данным [6] скорость реакции СВС в смесях оксидов может увеличиваться в электрическом поле, причем

эффект зависит от ориентации поля, что указывает на наличие нетепловых факторов воздействия.

Воздействие высокоамплитудного импульсного электрического поля на протекание СВС к настоящему времени практически не изучено. Привлекательность импульсной обработки реагирующих систем определяется наличием дополнительных активационных факторов, влияющих на параметры гетерогенной реакции. К числу таких факторов относятся локализованный разогрев областей контакта исходных частиц смеси под действием импульсного тока высокой плотности; мощные акустические колебания смеси, вызванные взаимодействием импульсного тока и порожденным им магнитным полем; высокие значения напряженности электрического ( $\geq 10^4$  В/м) и магнитного ( $\geq 10^5$  А/м) полей в реакционной смеси и др.

В настоящей работе проведено предварительное исследование воздействия импульсного электрического поля и импульсного электрического тока на протекание реакций СВС в смеси порошков никеля и алюминия. В качестве исходных компонентов использовали промышленные порошки никеля ПНК-2, ПНК0Т и алюминия АСД-4, ПА-4. Исходные компонен-

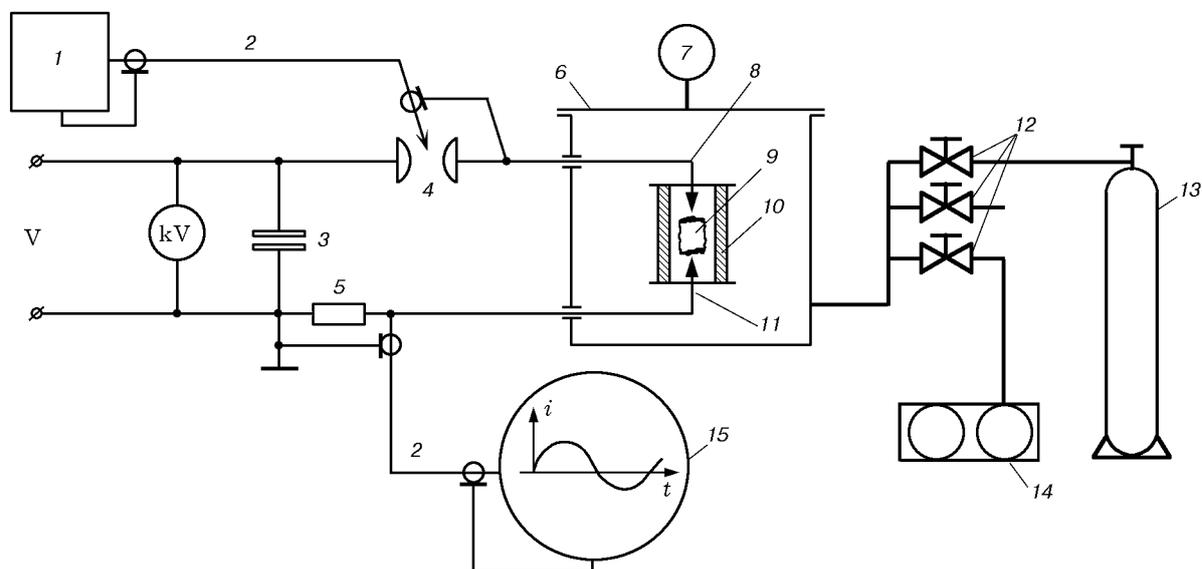


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — генератор импульсов, 2 — кабель, 3 — емкостный накопитель, 4 — разрядник, 5 — активный шунт, 6 — герметичная камера, 7 — манометр, 8 — высоковольтный электрод, 9 — образец, 10 — контейнер, 11 — заземленный электрод, 12 — вентили, 13 — баллон, 14 — насос, 15 — осциллограф

ты смешивали в необходимом соотношении и укладывали в контейнер — кварцевую трубку с внутренним диаметром  $7,5 \div 17,5$  мм и длиной 60 мм. Для инициирования реакции послойного горения смеси поверх исследуемого состава укладывали слой поджигающей смеси толщиной 2 мм.

Исследования проводили на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 1. Образец в контейнере помещается между электродами в герметичной камере. При необходимости камера предварительно вакуумируется с помощью механического вакуумного насоса 2НВР-5ДМ через нижний вентиль. Затем из баллона камера наполняется аргоном через верхний вентиль. Давление в камере контролируется манометрическим преобразователем.

Электрическая часть схемы включает высоковольтный и заземленный электроды, контактирующие с образцом и соединенные через разрядник с емкостным накопителем. При срабатывании разрядника энергия, первоначально запасенная в емкостном накопителе, выделяется в активном сопротивлении нагрузки. Частота срабатываний разрядника задается генератором импульсов, соединенным с управляющим электродом разрядника кабелем, и с та-

кой же частотой происходит зарядка емкостного накопителя до напряжения  $U$  от высоковольтного источника. Для регистрации разрядного тока — тока, проходящего через образец, используется активный шунт, с которого пропорциональный току сигнал по измерительному кабелю подается на вход осциллографа.

При запуске разрядника в результате прохождения импульсного тока происходит зажигание исследуемой смеси от иницирующего состава, и распространение волны горения осуществляется в условиях повторяющихся токовых импульсов в направлении горения. В эксперименте поддерживались следующие параметры электроимпульсной обработки: амплитуда токовых импульсов  $3 \div 5$  кА, длительность импульсов  $12 \div 20$  мкс, напряжение источника питания 4,1 кВ. Скорость горения определялась с использованием видеозаписи процесса, конечные продукты синтеза изучались с помощью металлографии и рентгенофазового анализа.

Как показали эксперименты, при использовании электродов конической формы и при частоте повторения импульсов до 10 Гц в зависимости от частоты импульсов, амплитудной плотности электрического тока и диаметра образца скорость горения увеличивается в  $1,3 \div 1,6$  раза по сравнению с горением в обыч-

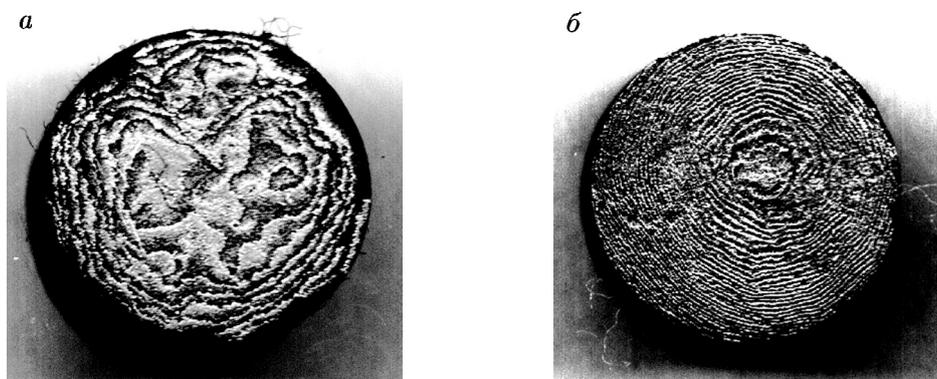


Рис. 2. Структура продуктов реакции при горении смеси Ni + 16,5 % Al в обычных условиях (а) и в условиях электроимпульсной обработки (б), диаметр образцов 17,0 мм

ных условиях. Линейная скорость горения стационарна в течение процесса. Макроструктура продуктов приобретает выраженную осевую симметрию (рис. 2), что, по-видимому, связано с симметричным искривлением поверхности фронта горения в условиях действия импульсного тока.

Необходимо отметить, что стационарное распространение волны горения в условиях электроимпульсной обработки реализуется не всегда. Например, при использовании электродов плоской формы и частоте повторения импульсов более 10 Гц наблюдалось значительное ускорение и многократное различие скоростей реакции на отдельных участках фронта горения. Внешне это проявляется в виде локальных «язычков» фронта, которые вытягиваются по мере распространения горения по образцу. Последнее, по-видимому, связано с неоднородным распределением электрического тока по сечению образца, где «язычки» фронта формируются на каналах наибольшей плотности тока.

Согласно данным рентгенофазового анализа продукт горения смеси Ni + 25 % Al (по массе) представляет собой набор фаз: NiAl (основная), Ni<sub>3</sub>Al, NiAl<sub>3</sub>, Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>. Под действием электроимпульсной обработки продукт горения обогащается фазами NiAl, Ni<sub>3</sub>Al за счет снижения количества неравновесных фаз Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub>. Продукт горения смеси Ni + 16,5 % Al представляет собой смесь фаз Ni<sub>3</sub>Al (основная) и NiAl. Под действием электрообработки происходит сужение дифракционных линий Ni<sub>3</sub>Al, NiAl, что также указывает на повы-

шение степени равновесности продукта и лучшую сформированность его кристаллической структуры.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о наличии электроимпульсной стимуляции процесса СВС. Аналогичное наблюдаемому при импульсной обработке изменение скорости горения (до 1,6 раза) в системе Ni–Al может быть достигнуто предварительным подогревом смеси до температуры более 100 °С [7]. Однако согласно проведенным измерениям реальный нагрев исходной смеси за счет диссипации электрической энергии в течение процесса горения ограничивается температурой 30 ÷ 40 °С. Последнее свидетельствует о нетепловой природе электроимпульсной стимуляции гетерогенной реакции.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 99-03-32465).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов Ю. М., Кирдяшкин А. И., Мержанов А. Г., Расколенко Л. Г. Влияние ультразвуковых колебаний на горение конденсированных систем с твердофазными продуктами реакции // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 6. С. 83–96.
2. Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., Мержанов А. Г. Влияние магнитного поля на горение гетерогенных систем с конденсированными продуктами // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 6. С. 65–72.
3. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. М.: Металлургия, 1987.

4. **Князик В. А., Мержанов А. Г., Соломонов В. Б., Штейнберг А. Г.** Макрокинетика высокотемпературного взаимодействия титана и углерода в условиях электротеплового взрыва // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 69–73.
5. **Gadevanishvili S., Munir Z. A.** Field assisted combustion of  $\text{MoSi}_2\text{-SiC}$  composites // Scr. Metall. Mater. 1994. V. 31, N 6. P. 741–743.
6. **Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Мержанов А. Г.** Нетепловое воздействие электрического поля на процесс СВС // Докл. РАН. 1997. Т. 352, № 6. С. 771–773.
7. **Итин В.И., Найбороденко Ю. С.** Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989.

*Поступила в редакцию 24/II 2000 г.*

---