

СТИМУЛИРОВАНИЕ НИЗКОЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ СВС ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

К.В.Зацепин, К.В.Лапшин

Часто в реагирующую смесь дисперсных материалов добавляется примесь инерта. Но, при увеличении его процентного содержания, автоволновая реакция смеси становится все более нестабильной и, в конечном счете, затухает, не успев прореагировать во всем реакционном объеме. Таким образом, для получения целевого продукта необходимо каким-либо образом стимулировать нестабильную автоволновую реакцию. Наличие у дисперсной среды Ni+Al конечной проводимости позволяет инициировать реакцию СВС помимо локального нагревателя также и джоулевым теплом [1]. Но, воздействуя на электропроводящий дисперсный образец электрическим током, может возникнуть опасность генерации электротеплового взрыва, который приведет к нежелательной деформации структуры прореагировавшего образца.

В данной статье предлагается метод стимуляции слабоэкзотермической волны горения СВС посредством электрического тока (рис.1а,б, где $R_{сп}$, $R_{ш}$, R – сопротивления спеченной, дисперсной, реагирующей среды).

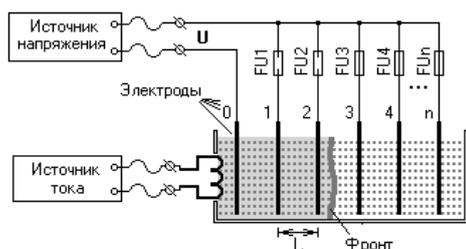


Рис.1а. Блок-схема установки стимуляции

В непроводящую термостойкую емкость засыпается шихта с инертными примесями. В шихте находятся электроды на расстоянии L друг от друга, в качестве которых можно использовать провода малого по сравнению с объемом емкости сечения. К каждому электроду подсоединены предохранители, рассчитанные на ток срабатывания $I_{пред}$. Предохранители и нулевой электрод подсоединены к источнику напряжения величиной U . Источ-

ник тока используется для питания локального источника тепла – нихромовой спирали, контактирующей с шихтой.

Нагретая до большой температуры ($800-1200^{\circ}\text{C}$) спираль инициирует реакцию СВС. Пройдя нулевой электрод, фронт горения образует движущийся в пространстве смеси электрод (поскольку, как показали исследования, прореагировавшая смесь имеет малое удельное сопротивление по сравнению с сопротивлением дисперсной смеси). Поскольку смесь имеет проводимость, то ток, протекающий через движущийся и первый электрод, вызывает выделение в смеси джоулева тепла, которое компенсирует пониженный тепловой эффект системы шихта+инерт. Для предотвращения неуправляемого электротеплового взрыва предусмотрены предохранители, срабатывающие при токе $I_{пред}$ на некотором расстоянии от первого электрода, тем самым, ограничивая поступление дополнительного тепла в систему. Нужно отметить, что в качестве предохранителей могут выступать электронные предохранительные схемы, либо резисторы номиналом порядка сопротивления прореагировавшей смеси. Реакция СВС последовательно стимулирует-

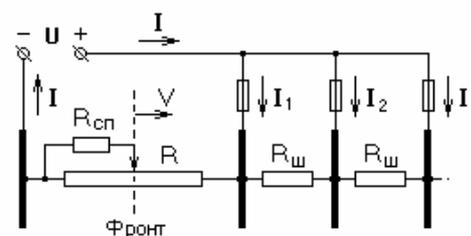


Рис.1б. Эквивалентная схема

ся каждым звеном электродов. В качестве электродов может выступать любая периодическая структура, например проложенная по дну емкости, удовлетворяющая конкретным технологическим требованиям.

Для расчета характеристик установки стимуляции рассмотрено отдельное звено электродов $n-1$, n . Для оценочного рассмотрения в плоском виде (рис.2). Принято, что:

СТИМУЛИРОВАНИЕ НИЗКОЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ СВС ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

1. движущийся со скоростью V электрод хф обладает, вместе с электродом $n-1$, полной проводимостью;

2. сопротивление между движущимся и n -ым электродами R уменьшается линейно:

$R(x) = \rho \frac{L-x}{S}$, где ρ – удельное сопротивление смеси, S – поперечная площадь сечения образца;

3. $x=x_n$ – координата фронта, при которой ток цепи достигает значения $I_{пред}$ и прекращается добавление электрической мощности, поддерживающей реакцию, после чего реакция некоторое время протекает по инерции до следующего звена электродов.

Тепловое уравнение можно представить в следующем виде, при условии, что скорость фронта $V=const$:

$$\Delta Q_{дон} = P_{дон} \frac{L}{V} \equiv \Delta Q_{эл} = \frac{1}{V} \int_0^{x_n} P_{эл} dx, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{дон}$ – недостающее для поддержания реакции количество тепла, $P_{дон}$ – недостающая мощность, находится эксперимен-

тально, $\Delta Q_{эл}$ – эквивалентное количество тепла, $P_{эл} = \frac{U^2}{R(x)}$ – электрическая мощность. Из

уравнения получено $P_{дон} = P_0 \ln \frac{L}{\Delta x}$ (где

$P_0 = \frac{U^2 S}{\rho L}$, $\Delta x = L - x_n$), или, выразив экспоненциально:

$$L = \Delta x \cdot e^{\frac{P_{дон}}{P_0}} \quad (2)$$

Выражения для предельного тока срабатывания предохранителей $I_{пред}$ и начального тока I_0 имеют следующие виды соответственно:

$$I_{пред} = I(x_n) = \frac{U}{R(x_n)} = \frac{US}{\rho \Delta x} = \frac{US}{\rho L} e^{\frac{P_{дон}}{P_0}} \quad \text{и}$$

$$I_0 = I(0) = \frac{U}{R(0)} = \frac{US}{\rho L}, \quad \text{или:}$$

$$I_{пред} = I_0 e^{\frac{P_{дон}}{P_0}} \quad (3)$$

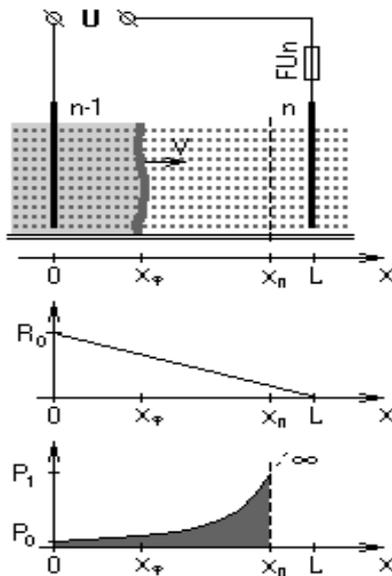


Рис. 2

Таким образом для реализации установки стимуляции необходимо знать следующие величины: сопротивление спеченного продукта; пределы и способы изменения величины удельного сопротивления ρ дисперсной среды; поведение сопротивления смеси пе-

ред фронтом реакции для нахождения величины L ; энергетические затраты $P_{дон}$ и P_0 .

В результате проведенных исследований электрофизических характеристик дисперсной среды Ni+Al были получены следующие зависимости:

Проведена экспериментальная апробация метода стимуляции. В непроводящую термостойкую емкость, с внутренним объемом $(54 \times 5 \times 9) \times 10^{-9} \text{ м}^3$, засыпалась шихта Ni+Al с 40% содержанием инертного наполнителя Ni₃Al. Толщина насыпанного в емкость порошка $2.5 \times 10^{-3} \text{ м}$. Проведен эксперимент по иницированию реакции СВС вдоль емкости локальным нагревателем без стимуляции электрическим током.

Автоволновая реакция смеси остановилась примерно на середине длины емкости, поскольку энергия иницирующего импульса диссипировала на прогрев инерта и емкости (см. фото.1). Покажем, что применение метода стимуляции слабозкотермической волны горения позволяет поддерживать автоволновую реакцию во всем реакционном объеме без генерации электротеплового взрыва.

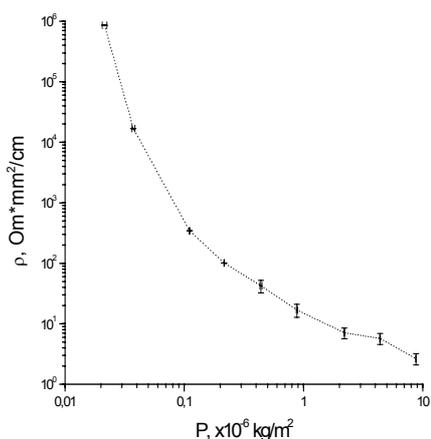


Рис.3. Зависимость удельного сопротивления смеси от давления прессования

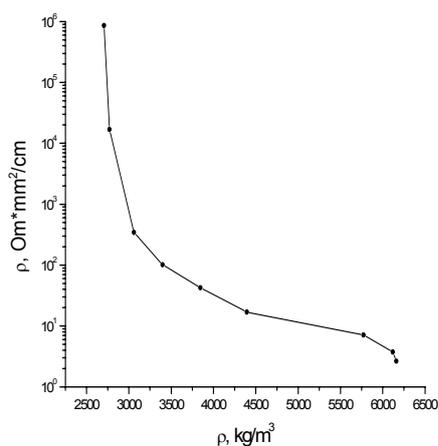


Рис.4. Зависимость удельного сопротивления смеси от ее плотности

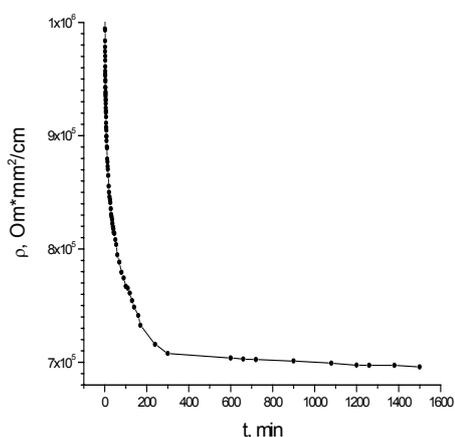


Рис.5. Зависимость удельного сопротивления смеси от времени прессования под давлением $(21.48 \pm 0.44) \times 10^3 \text{ kg/m}^2$. Хорошо согласуется с [2]

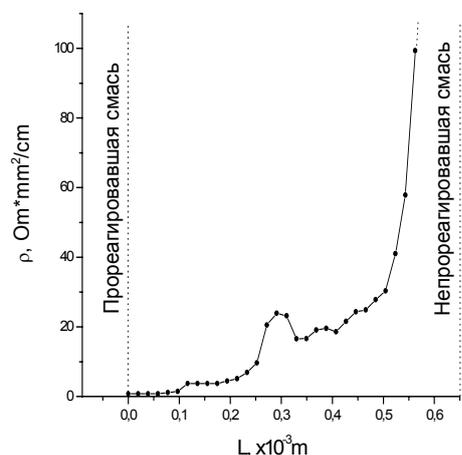


Рис.6. Поведение удельного сопротивления реакционной смеси Ni+Al во время протекания СВС (немонотонное изменение ρ вызвано эффектом метастабильной локализации тепла в волне горения)

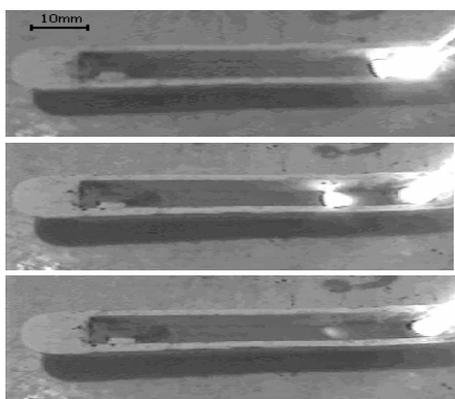


Фото.1. Остановившаяся автоволновая реакция

По полученным экспериментальным данным оценены электрические и механические параметры установки стимуляции реакции СВС сильноразбавленной смеси порошков Ni+Al. Исходя из: $P_{доп}=700\text{Вт}$, $U=10\text{В}$, $S=100\text{мм}^2$, $\rho=1000\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{см}$, $\Delta x=1.6\text{мм}$, при $P_{доп} = P_0$, по (2, 3) находим: $L=0.44\text{см}$, $I_0=2.30\text{А}$, $I_{пред}=6.25\text{А}$. Проведен эксперимент по стимуляции волны горения электрическим током. В непроводящую термостойкую емкость с периодическими контактами (как показано на рис.1) засыпался аналогичный предыдущему эксперименту порошок. К каждому электроду подсоединен проволочный предохранитель, рассчитанный на ток срабатывания $I_{пред}$. Реакция СВС инициирована локальным нагревателем. По характеру поведения

СТИМУЛИРОВАНИЕ НИЗКОЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ СВС ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

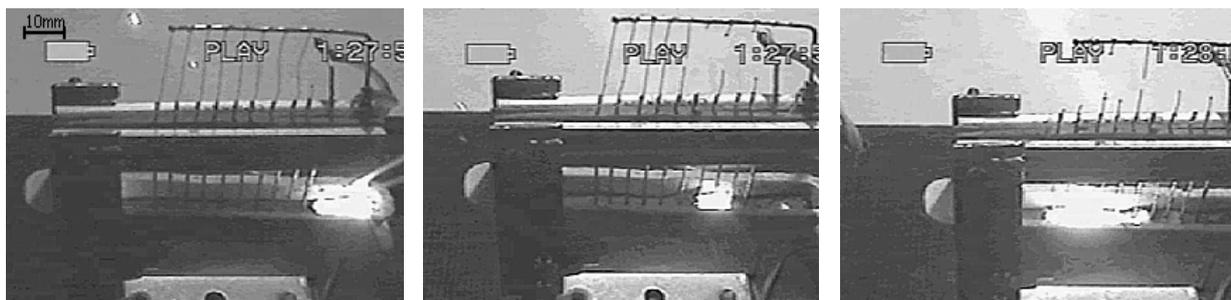


Фото 2. Стимулированная реакция

волны горения было очевидно влияние на реакцию электрического тока, благодаря чему процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза протек во всем реакционном пространстве без генерации электротеплового взрыва (см. фото. 2, 3). Кроме того, предложенный метод позволяет управлять скоростью реакции, в результате чего возможно получение композиционных материалов с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А.Г. Твердопламенное горение. – Черногловка: ИСМАН, – 2000, – С.224
2. Кирдяшкин А.И., Юсупов Р.А., Максимов Ю.М., Китлер В.Д. Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материалов. // Физика горения и взрыва. – 2002. – т.38. №5. – С.85-89.