

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ СВС ВДОЛЬ НИТИ ПРИ ЭКРАНИРОВАНИИ ЛУЧИСТЫХ ТЕПЛОПТЕРЬ

А.П. Алдушин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\* [analdushin@mail.ru](mailto:analdushin@mail.ru)

Традиционным объектом исследования СВС процессов являются смеси порошков в виде прессованных образцов различных трехмерных конфигураций. Исследование механизма синтеза соединений в таких системах чрезвычайно затруднено сложными процессами тепломассопереноса, сопровождающими распространение волны горения в пористых средах. Для непосредственного изучения макрокинетики реакционного взаимодействия в СВС системах представляют интерес одномерные линейные объекты в виде проволоки (нити) в которых отсутствуют сложные сопутствующие процессы, характерные для пористых сред. Для линейных объектов может быть поставлена задача количественного описания СВС процессов, что представляется нереальным для пористых сред. Обширный материал, накопленный при исследовании высокотемпературного взаимодействия металлов с газами и углеродом [1–3] даёт кинетическую базу для теоретического описания распространения волновых процессов окисления, азотирования, гидрирования и карбидизации проволок. Помимо научного интереса, линейные системы могут оказаться привлекательными в плане производства нитей из материалов, составляющих номенклатуру объектов. Практическая реализация самораспространяющейся волны горения в линейных объектах ограничена потерями тепла из зоны реакции. При уменьшении поперечного сечения образца доля энергии, рассеиваемая в окружающую среду путем конвекции и радиации, быстро увеличивается, что приводит к невозможности организации медленно протекающих процессов СВС в объектах малого сечения. Возможным способом решения проблемы является уменьшение теплотерь с помощью специальных экранов, отражающих излучение. Данный прием находит применение в практике исследования СВС процессов на трехмерных объектах. Предполагается, что экранирование препятствует сильному снижению температуры в зоне реакции, что предотвращает тепловой срыв горения.

В данной работе проведено математическое моделирование распространения твердого пламени по нити в условиях экранирования теплового излучения. Физическая

постановка задачи предполагает, что нить, по которой распространяется волна горения, расположена вдоль оси цилиндрической оболочки, отражающей тепловое излучение высокотемпературных продуктов реакции. Сечение нити считается достаточно малым, чтобы пренебречь распределением температуры по радиусу и рассматривать задачу в одномерной постановке. Излучаемое нитью тепло частично поглощается оболочкой, остальная часть возвращается на нить по закону зеркального отражения. Математическая формулировка проблемы сводится к уравнению (1) распространения тепла вдоль нити с учетом конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой и кинетического уравнения (2), определяющего скорость генерации тепла в результате реакции:

$$(1) \quad c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{2Nu\lambda_g}{r^2}(T - T_0) - \frac{2}{r}\sigma_{eff}(T^4 - T_0^4) + \frac{2}{r}\sigma_{eff}\varepsilon I + 2Q\rho(1-\eta) \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

$$(2) \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = K(T)\varphi(\eta)$$

$$(3) \quad I = \frac{2H}{\pi} \int_0^L \{[(T(\zeta)^4 - T_0^4)] / [(x - \zeta)^4 + 4H^2]\} d\zeta$$

Здесь  $t$  – время,  $x$  – координата вдоль нити,  $T, T_0$  – текущая и начальная температура нити,  $c, \rho$  – теплоёмкость и плотность нити,  $Q$  – тепловой эффект конверсии единицы массы нити,  $\lambda, \lambda_g$  – теплопроводности нити и газа,  $Nu$  – критерий Нуссельта, определяющий интенсивность конвективного теплообмена,  $\sigma_{eff}$  – эффективная излучательная способность поверхности нити,  $\varepsilon$  – коэффициент отражения излучения экраном.

Интеграл  $I$ , характеризующий долю излучения возвращаемого нити, вычислен в предположении малого отношения радиуса нити  $r$  к радиусу экранирующего цилиндра  $H$ . Применительно к СВС процессам макрокинетическое уравнение (2) описывает зависимость скорости гетерогенной реакции от толщины нарастающего слоя продукта  $\delta = \eta r$  и температуры ( $K = k_0 \exp(-E/RT)$ ). Для рыхлых, легко проницаемых, пленок обычно принимается  $\varphi = 1$ , в случае плотного слоя продукта используется так называемый параболический закон превращения ( $\varphi = 1/\eta$ ). В данных расчетах использовался линейный закон конверсии ( $\varphi = 1$ ). Инициирование волны горения в численных

экспериментах осуществлялось импульсным высокотемпературным источником на левом конце расчетного домена ( $0 < x < L$ ). Длина нити  $L$  выбиралась достаточно большой для выхода на установившийся режим горения.

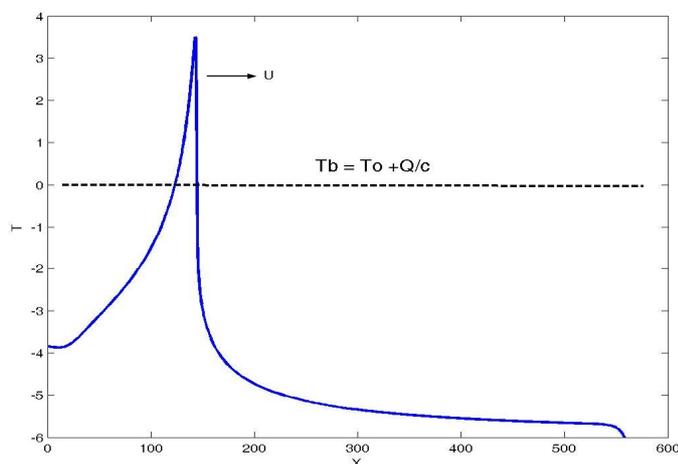


Рис .1 Температурный профиль волны горения, распространяющейся по нити при наличии отражателя излучения.

Проведенное математическое моделирование показало, что в линейных объектах эффект экранирования излучения может проявляться не только в уменьшении потерь тепла, но и в значительном перегреве зоны реакции по сравнению с адиабатической волной горения. На рисунке 1 показан температурный профиль волны горения, распространяющейся по нити при наличии отражателя излучения.

В данном варианте расчета выбран сверхкритический уровень потерь тепла на излучение, при котором распространение волны реакции при отсутствии отражателя не происходит. Коэффициент отражения лучистого потока составляет 10%. Как видно из рисунка, в этих условиях температура в зоне реакции существенно выше значения  $T_b = T_0 + Q/c$ , определяемой термодинамикой процесса. Скорость распространения волны  $U$  примерно на порядок превышает скорость горения нити в адиабатических условиях.

### Литература

1. С.Г. Вадченко, Ю.М. Григорьев. *Известия АН СССР. Металлы*, 1979, № 1, стр. 187–195.
2. С.Г. Вадченко, Ю.М. Григорьев. *Физ. метал. и металлов.*, 1975, т. 40, № 1, стр. 1204–1209.
3. И.П. Боровинская, С.Г. Вадченко, А.Г. Мержанов. *ДАН*, 1996, т. 350, № 3, стр. 338–340.