

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ СИСТЕМЫ  
СОПРЯЖЕННЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ СОСТАВОВ TI+AL И NI+AL**Т. И. Худякова<sup>1,2</sup>Научный руководитель: профессор, ф. м. н. В. Г. Прокофьев<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>2</sup>Томский научный центр СО РАН, Россия, г. Томск, Академический пр., 10/3, 634055E-mail: [tai\\_hudikova@mail.ru](mailto:tai_hudikova@mail.ru)**MATHEMATICAL MODELING OF THE GAS-FREE COMBUSTION OF THE SYSTEM OF  
CONJUGATED LAYERS BASED ON THE COMPOSITIONS OF TI + AL AND NI + AL**T.I. Hudyakova<sup>1,2</sup>Scientific Supervisor: Prof., Dr. V. G. Prokofiev<sup>1</sup>,<sup>1</sup>Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050<sup>2</sup>Tomsk Scientific Center of the SB RAS, Russia, Tomsk, Academic str., 10/3, 634055E-mail: [tai\\_hudikova@mail.ru](mailto:tai_hudikova@mail.ru)

***Abstract.** In the present study was carried out the gas-free combustion of a system of conjugated layers based on the composition of Ti + Al and Ni + Al. A numerical solution is obtained based on mathematical simulation of the synthesis of a layer system in a two-dimensional plane-symmetric formulation. The optimal distribution of the acceptor and donor layers was founded.*

**Введение.** Создание композиционных материалов, содержащих акцепторные и донорные слои с различными теплофизическими параметрами, является одним из направлений метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. С помощью эффекта «химичкой печки», что является дополнительным источником тепла, вследствие протекания сильной экзотермической реакции можно добиться синтеза плохо реагирующих между собой систем [1]. Для формирования композита нужно знать теплофизические и формально-кинетические параметры реагирующей порошковой смеси. В работе [2], проведены численные исследования синтеза слоевого материала в условиях сопряженного теплообмена и установлено существенное влияние теплофизических свойств инертных материалов на распределение температуры в стационарных и нестационарных режимах.

Целью данной работы является нахождение такого соотношения и распределения акцепторного и донорного слоев порошковых смесей Ni+Al (донорный состав) и Ti+Al (акцепторный состав), при котором реализуется наиболее оптимальный режим синтеза слоевого композита.

**Материалы и методы исследования.** Физическая постановка задачи заключается в последовательном комбинировании сопряженных слоев: акцепторного (Ti+Al) и донорного (Ni+Al). Зажигание образца выполняется с помощью кратковременного контактирования с накаливаемой поверхностью всех слоев системы. Поверхность слоевого композита, противоположная плоскости зажигания, теплоизолирована. Безразмерное время контакта системы с накаливаемой поверхностью при всех вычислениях оставалась постоянной  $\tau_{ign} = 500$ .

Получено численное решение на основе математического моделирования синтеза слоевой системы в двумерной плоскосимметричной постановке [3], включающее в себя следующие уравнения:

Уравнение теплопроводности:

$$c(\xi) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \lambda(\xi) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) + \lambda(\xi) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \eta}{\partial \tau},$$

Уравнение химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \gamma(1-\eta) \exp \frac{\sigma \theta}{1 + \Lambda \Gamma \theta} \quad (\xi_1 < \xi < \xi_1 + \xi_0), \text{ где } \xi_0 \text{ — толщина активного слоя.}$$

Краевые условия задачи:

$$\tau \leq \tau_{\text{ign}} : \theta(0, \xi, \tau) = 0, \quad \tau > \tau_{\text{ign}} : \frac{\partial \theta(0, \xi, \tau)}{\partial z} = 0, \quad \xi = \xi_0 : \theta_1 = \theta_2, \quad \Lambda \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} = \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial \theta(L, \xi, \tau)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \theta_2(z, Y, \tau)}{\partial \xi} + \alpha_t [\theta_2(z, Y, \tau) - \theta_0] = 0, \quad \theta(z, \xi, 0) = \theta_0, \quad \eta(z, \xi, 0) = 0.$$

**Результаты.** В ходе численного решения задачи было найдено полное время горения слоевой системы в зависимости от отношения компонентов слоев и начальной температуры для трехслойной композиции рис. 1. При расчетах вводились следующие соотношения:  $N$  – количество слоевых пар,  $y$  – толщина донорного слоя,  $\tau_0$  – время горения образца, сформированного только из донорной смеси.

При увеличении начальной температуры, время прохождения химической реакции значительно уменьшается.

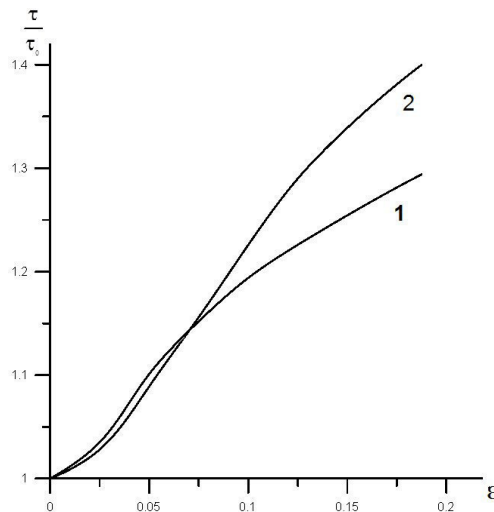


Рис. 1. Время полного горения слоевой системы

$$(1: \theta_0 = -6,53, 2: \theta_0 = -7,46, \varepsilon = \frac{N * y}{Y})$$

Однако при начальной температуре  $\theta_0 = -7,46$ , нарушается предел устойчивости горения системы. Рассчитано время горения образца в зависимости от количества слоевых пар донор-акцептор и их объёмного содержания в образце рис.2.

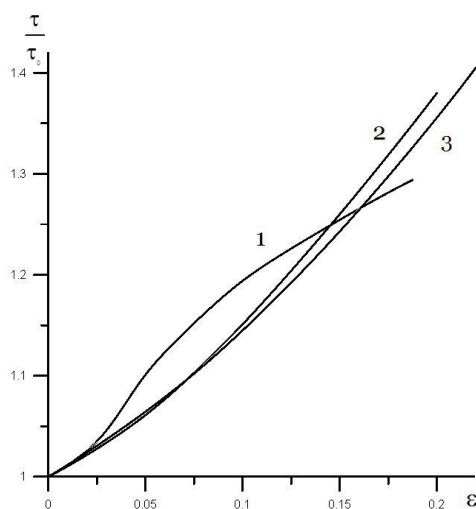


Рис. 2. Зависимость времени горения образца от количества слоев пар  
(1:  $N = 2$ , 2:  $N=4$ , 3:  $N=6$ ,  $\theta_0 = -6,53$ )

Из рисунка 2 видно, что при количестве слоев пар  $N=6$ , происходит наиболее быстрое горение системы сопряженных слоев.

**Выводы.** Для создания слоевого композита из определенного соотношения акцепторных и донорных слоев, самым оптимальным соотношением будет разбиение акцепторных и донорных слоев на 6 пар. При таком задании параметров происходит наиболее быстрое горение системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г. Термически сопряженные процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 434. – №4. – С. 489–492.
2. Алигожина К.А. Моделирование распространения твердофазной реакции в условиях сопряженного теплообмена / К.А Алигожина, А. Г. Князева. // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т.53. – №4. С. 48–57.
3. Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. Безгазовое горение системы термически сопряженных слоев. // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т.52. – №1. – С. 70–75.