

## **ТЕРМОКИНЕТИКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО СВС ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБ**

*Р.А. Садыков, В.И. Потанов*

Приведены данные о результатах математического моделирования процесса производства металлокерамических труб. Исследовано влияние степени уплотнения смеси СВС на процесс теплообмена и теплопередачи. Установлено, что увеличение пористости снижает площадь теплового контакта со стенкой трубы, что приводит к ухудшению теплообмена со стенкой трубы и улучшению теплопередачи по смеси.

Ключевые слова: СВС-металлургия, математическое моделирование, теплообмен, пористость.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) представляет собой процесс экзотермической химической реакции, в котором тепловыделение локализовано в слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи [1]. Этот метод получения новых материалов получил распространение в различных отраслях промышленности. К основным преимуществам технологии СВС относятся: низкие энергозатраты, простота и высокая производительность технологического оборудования, снижение стоимости сырья и др.

В настоящее время СВС-металлургия – это одно из перспективных направлений СВС, которое основано на горении смесей окислов металлов

с восстановителем и неметаллами. В результате СВС-металлургии получают высокотемпературные расплавы тугоплавких неорганических соединений, применяющиеся для производства литых изделий, износостойких защитных покрытий.

В основе способа покрытия внутренней поверхности труб защитным покрытием лежат реакции экзотермического взаимодействия нескольких химических элементов или соединений, протекающие в режиме направленного горения [2]. После инициирования и некоторого переходного периода устанавливается определенный режим распространения реакции. Этот режим близок стационарному и характеризуется постоянной скоростью распространения фронта горения во времени и по сечению образца.

Теплофизические процессы в волне горения носят управляемый характер, строго подчиняются своим внутренним закономерностям. Управляют синтезом множество факторов: химический состав, теплофизические и геометрические параметры порошков смеси СВС, которые в конечном итоге влияют на качество образовавшегося покрытия.

Различный характер уплотнения порошков смеси обязательно приводит к различным закономерностям горения, определяющих параметры тепловыделения и кинематику реакций: ухудшение контакта между частицами (уменьшение плотности) легко приводит к затуханию процесса [3].

С целью управления технологическим процессом, снижения стоимости и прогнозирования результатов экспериментов можно использовать методы математического моделирования, следовательно, возникает необходимость разработки математической модели процесса СВС, которая учитывает степень уплотнения смеси СВС.

В работе [4] при создании математической модели было принято, что теплообмен происходит только радиально, и не учитывалась скорость фронта горения, от которой во многом зависят условия протекания процесса. В работах [3, 5] были предложены уравнения распространения фронта синтеза и его структуры, в которых не учитывались степень уплотнения смеси СВС, теплотери в окружающую среду в результате горения. Предложенные математические модели не рассматривают многих важных физико-химических факторов и процессов, поэтому не дают точную информацию о структуре волны горения.

В данном исследовании представлена математическая модель процесса, учитывающая кинетику процесса горения, его теплофизические факторы, в том числе скорость распространения фронта горения, пористость смеси.

Процесс нанесения СВС-покрытия как объект многослойной структуры описывается системой уравнений, начальными и граничными условиями (1)–(3) вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_{cm}}{\partial t} = \chi_{cm,s1}(T_{s1} - T_{cm}) + \chi_{cm,cm}(T_{cm} - T_{cm}) + a_{cm} \frac{\partial^2 T_{cm}}{\partial x^2}; \\ \beta \frac{\partial T_{cm}}{\partial t} + \beta v_z \frac{\partial T_{cm}}{\partial x} = \chi_{cm,cm}(T_{cm} - T_{cm}) + \chi_{cm,s2}(T_{s2} - T_{cm}) + \\ + a_{cm}(1 - \beta) \frac{\partial^2 T_{cm}}{\partial x^2} + \frac{Q(S_{sa} k_0) e^{-\frac{E}{RT_{cm}}}}{c_p \rho} \varphi(\eta); \\ \frac{d\eta}{dt} + v_z \frac{d\eta}{dx} = (S_{sa} k_0) e^{-\frac{E_A}{RT_{cm}}} \varphi(\eta), \end{array} \right. \quad (1)$$

$$T_{cm}(x,0) = \zeta_{cm}(x); \quad T_{cm}(x,0) = \xi_{cm}(x); \quad \eta(x,0) = \xi_{\eta}(x), \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{cm}(0,t) = \Phi_{cm}(t); \\ T_{cm}(0,t) = \Phi_{cm}(t); \\ \eta(0,t) = \Phi_{\eta}(t); \\ \lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}(0,t)}{\partial x} = \alpha_{cm,cm}(T_{cm}(0,t) - T_{cm}(0,t)); \\ \lambda_{cm} \frac{\partial T_{cm}(0,t)}{\partial x} = \alpha_{cm,cm}(T_{cm}(0,t) - T_{cm}(0,t)), \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $\chi_{cm,s1} = \frac{\alpha_{cm,s1} P_{cm,s1}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{cm}}$ ,  $\chi_{cm,cm} = \frac{\alpha_{cm,cm} P_{cm,cm}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{cm}}$ ,  $\chi_{cm,s2} = \frac{\alpha_{cm,s2} P_{cm,s2}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{cm}}$ ,  $\chi_{cm,cm} = \frac{\alpha_{cm,cm} P_{cm,cm}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{cm}}$ ,  
 $\varphi(\eta) = (1 - \eta)^y$ ;  $T_{s1}, T_{s2}, T_{cm}, T_{cm}$  – температуры внешней окружающей среды, внутренней окружающей среды, смеси и стенки;  $\alpha_{cm,s1}, \alpha_{cm,cm}, \alpha_{cm,s2}, \alpha_{cm,cm}$  – коэффициенты теплоотдачи от стенки к внешней окружающей среде, от стенки к покрытию, от покрытия к внутренней окружающей среде и от покрытия к стенке;  $\beta$  – пористость смеси СВС;  $\eta$  – глубина химического превращения реагентов ( $0 < \eta < 1$ );  $\rho_{cm}, \rho_{cm}$  – плотности стенки и покрытия;  $a_{cm}, a_{cm}$  – температуропроводности стенки и покрытия;  $c_{cm}, c_{cm}$  – удельные теплоемкости стенки и покрытия;  $P_{cm,s1}, P_{cm,cm}, P_{cm,s2}, P_{cm,cm}$  – периметры раздела между стенкой и внешней окружающей средой, между стенкой и покрытием, между покрытием и внутренней окружающей средой и между покрытием и стенкой;  $S_{cm}, S_{cm}$  – площади поперечного сечения стенки трубы и покрытия;  $S_{sa}$  – удельная поверхность раздела реагентов;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_A$  – энергия активации химической реакции;  $R$  – газовая постоянная;  $Q$  – тепловой эффект реакции.

При составлении математического модели процесса теплового обмена были приняты следующие допущения: толщина слоя смеси СВС постоянная по радиусу и по длине, температура и химический состав смеси не влияет на теплофизические параметры сред.

Тепловой эффект реакции  $Q$  вычисляли как сумму тепла, выделяющегося в ходе экзотермической химической реакции. Числовые значения были взяты из программного комплекса и баз данных FactSage.

С помощью метода конечных разностей и ряда преобразований представили математическую модель, описанную уравнениями (1)–(3), в дискретном блочно-матричном виде (4):

$$\Theta_m^{n+1} = M\Theta_m^n + E_s\Theta_s + L, \quad (4)$$

$$\text{где } \Theta_m^{n+1} = \begin{bmatrix} T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{n+1} \\ T_m^{n+1} \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} V & X & \cdots & \cdots & 0 \\ A & B & C & \cdots & 0 \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & \cdots & A & B & C \\ 0 & \cdots & \cdots & Y & Z \end{bmatrix}, \quad \Theta_m^n = \begin{bmatrix} T_1^n \\ T_2^n \\ \vdots \\ T_{m-1}^n \\ T_m^n \end{bmatrix}, \quad E_s = \begin{bmatrix} E & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & E & \cdots & \cdots & 0 \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & \cdots & \cdots & E & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & E \end{bmatrix},$$

$$\Theta_s = \begin{bmatrix} T_s \\ T_s \\ \vdots \\ T_s \\ T_s \end{bmatrix}, \quad T_i^{n+1} = \begin{bmatrix} T_{cmi}^{n+1} \\ T_{cmi}^{n+1} \\ \eta_i^{n+1} \end{bmatrix}, \quad T_i^n = \begin{bmatrix} T_{cmi}^n \\ T_{cmi}^n \\ \eta_i^n \end{bmatrix}, \quad T_s = \begin{bmatrix} T_{s1} \\ T_{s2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 & D_1 & 0 \\ D_2 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} A_1 \cdot I_1 + B_1 & A_1 \cdot I_2 + D_1 & 0 \\ A_2 \cdot I_4 + D_2 & A_2 \cdot I_3 + B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} A_1 + C_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 + C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} A_1 + C_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 + C_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} C_1 \cdot I_2 + B_1 & C_1 \cdot I_1 + D_1 & 0 \\ C_2 \cdot I_3 + D_2 & C_2 \cdot I_4 + B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \frac{\tau a_{cm}}{h^2}, \quad B_1 = 1 - \tau \chi_{cm,s1} - \tau \chi_{cm,cm} - \frac{2\tau a_{cm}}{h^2}, \quad C_1 = \frac{\tau a_{cm}}{h^2}, \quad D_1 = \tau \chi_{cm,cm}, \quad E_1 = \tau \chi_{cm,s1},$$

$$\theta_1 = 0, \quad A_2 = \frac{\tau a_{cm}}{h^2} + \frac{\tau v_z}{2h}, \quad B_2 = 1 - \frac{\tau \chi_{cm,cm}}{\beta} - \frac{\tau \chi_{cm,s2}}{\beta} - \frac{2\tau a_{cm}}{h^2}, \quad C_2 = \frac{\tau a_{cm}}{h^2} - \frac{\tau v_z}{2h},$$

$$D_2 = \frac{\tau \chi_{cm,cm}}{\beta}, \quad E_2 = \frac{\tau \chi_{cm,s2}}{\beta}, \quad \theta_2 = \frac{q(S_{sa}k_0)e^{-\frac{E}{RT_{cm}}}}{c_p \rho} \varphi(\eta), \quad A_3 = \frac{\tau v_z}{2h},$$

$$B_3 = 1 - \tau S_{sa}k_0 e^{-\frac{E}{RT_{cm}}}, \quad C_3 = -\frac{\tau v_z}{2h}, \quad D_3 = 0, \quad E_3 = 0, \quad \theta_3 = \tau S_{sa}k_0 e^{-\frac{E}{RT_{cm}}},$$

$$I_1 = -\frac{2h\alpha_{cm,cm}}{\lambda_{cm}}, \quad I_2 = \frac{2h\alpha_{cm,cm}}{\lambda_{cm}}, \quad I_3 = -\frac{2h\alpha_{cm,cm}}{\lambda_{cm}}, \quad I_4 = \frac{2h\alpha_{cm,cm}}{\lambda_{cm}}.$$

Выбор размера шага сетки дискретной модели влияет на сходимость численного решения, а также на устойчивость схемы. Результаты исследований работы [6] были использованы при решении данной задачи. Для устойчивости разностной схемы между пространственными шагами разностной сетки должно соблюдаться соотношение:  $\tau v_c < h$ .

Предложенная в настоящей работе математическая модель термокинетики процесса формирования внутритрубного покрытия методами центробежной СВС-металлургии реализована в программной системе Matlab. В ходе многочисленных расчетов были получены зависимости, некоторые из них показаны на рис. 1 и 2.

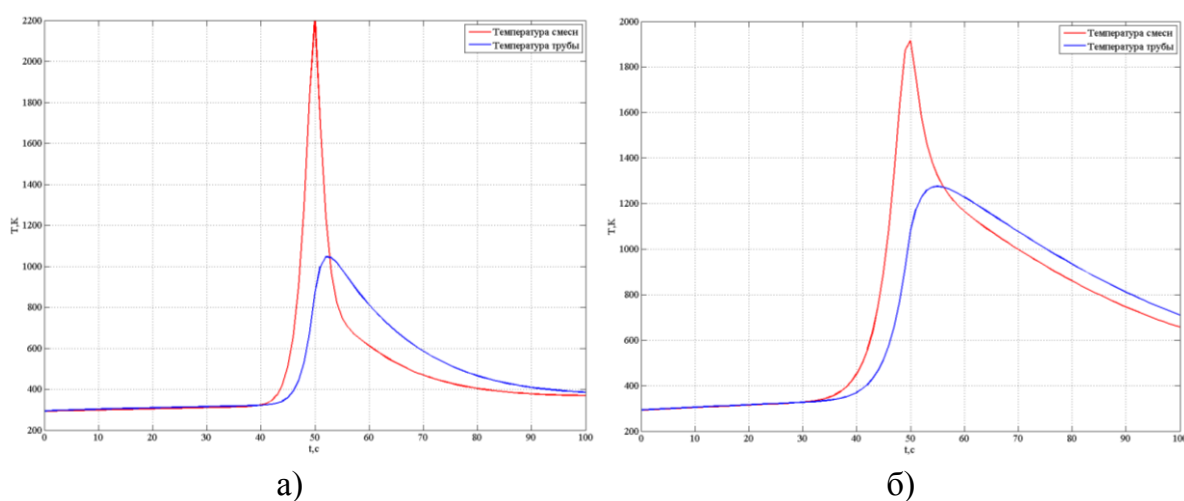


Рис. 1. Зависимость распределения температур сред от времени:  
а) в сечении  $S=0,5$  м при  $\beta=0,7$   
б) в сечении  $S=0,5$  м при  $\beta=0,25$

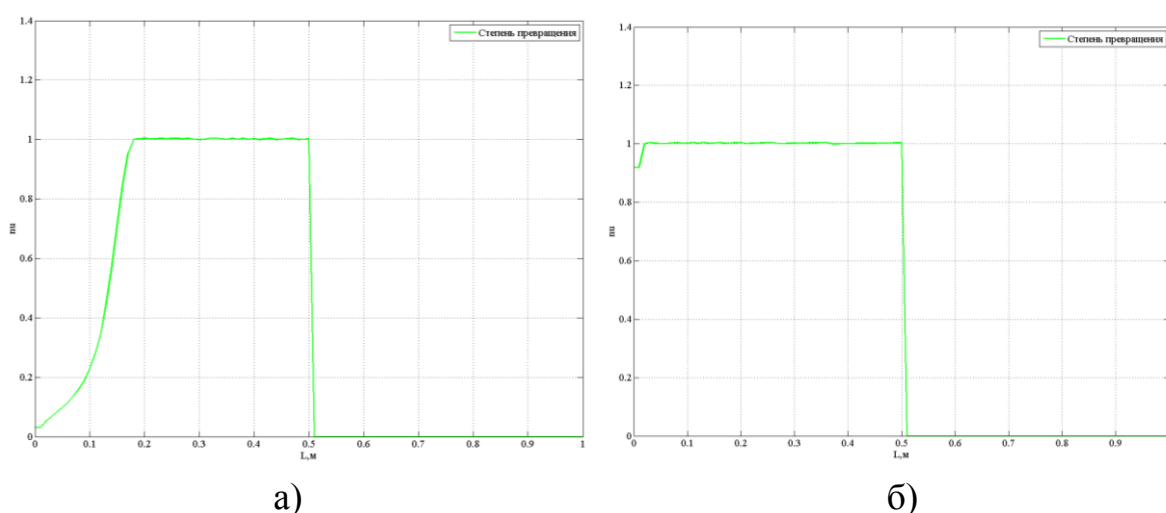


Рис. 2. Зависимость степени превращения химической реакции по длине трубы:  
а) при  $t=50$  с и  $\beta=0,7$   
б) при  $t=50$  с и  $\beta=0,25$

**Заключение.** В результате проведенных исследований теплофизических процессов нанесения внутритрубного покрытия центробежным СВС установлено, что увеличение пористости смеси, с одной стороны, приводит к снижению интенсивности теплообмена между смесью и стенкой трубы (снижение температуры стенки трубы  $T_{ст} \approx 1050$  К при максимальной температуре смеси  $T_{см} \approx 2200$  К), с другой стороны – к увеличению теплопередачи по слою смеси (ярко выраженная «пика»). Энергия концентрируется во фронте горения: смесь достигает более высокой температуры ( $T_{см} \approx 2200$  К) по сравнению с менее пористой смесью.

В свою очередь, уменьшение пористости смеси СВС увеличивает площадь контакта смеси и стенки, что приводит к увеличению теплообмена между смесью СВС и стенкой трубы (температура стенки трубы прогревается до  $T_{ст} \approx 1300$  К при максимальной температуре смеси  $T_{см} \approx 1900$  К) и способствует лучшему прогреванию смеси по длине («пика» более сглажена).

Из рис. 2 можно сделать вывод, что при увеличении уплотнения смеси в месте поджигания более качественно протекает химический процесс. Это выражается в величине степени превращения химических реагентов: при  $\beta=0,25$  почти вся смесь образует защитное покрытие трубы ( $\eta \approx 0,9$ ). Обратная картина наблюдается при увеличении пористости СВС-смеси: при  $\beta=0,7$  степень превращения  $\eta \approx 0,05$ . Этот факт говорит о нехватки энергии для полноты химических превращений в начальных срезах трубы.

Как было отмечено ранее, увеличение пористости среды повышает температуру горения смеси. В свою очередь от температуры горения сильно зависит скорость продвижения фронта горения [3]. Чем быстрее проходит фронт по смеси, тем менее качественно прогорает смесь (протекает химическая реакция).

#### Библиографический список

1. Межанов, А.Г. О самораспространяющимся высокотемпературном синтезе / А.Г. Межанов, А.Е. Сычев. – URL: <http://ism.ac.ru>.
2. Научно-технические разработки в области СВС: Справочник / под общ. ред. акад. А.Г. Мержанова. – Черноголовка, ИСМАН, 1999. – 196 с.
3. Мержанов, А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез / А.Г. Мержанов // Физическая химия. Современные проблемы. Ежегодник / под ред. акад. Я.М. Колотыркина. – М.: Химия, 1983. – 224 с.
4. Wang, Yu-Fei. Finite element analysis of residual thermal stress in ceramic-lined composite pipe prepared by centrifugal-SHS / Yu-Fei Wang, Zhen-Guo Yang // Materials Science and Engineering. – 2007. – V. 460, № 4. – Pp. 130–134
5. Мержанов, А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мержанов, А.С. Мукасян. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. – 336 с.

6. Потапов, В.И. Математические модели теплофизических процессов в объектах многослойной структуры: монография / В.И. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 270 с.

[К содержанию](#)