

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ХОДЕ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СВС

Р.А. Садыков, В.И. Потапов, А.А. Любимова, Е.А. Трофимов

Совершенствование технологии получения композиционных слоистых металлокерамических труб с внешним металлическим и внутренним керамическим слоями с помощью реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), разработанной в 70-х годах прошлого века, до настоящего времени остаётся актуальной задачей. Технология при всей её перспективности нестабильна и её широкое внедрение невозможно без проведения работ по её оптимизации. Разработке оптимальной методики получения покрытия, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям, будет способствовать создание математической модели процесса нанесения внутритрубного покрытия методом центробежного СВС, которая бы учитывала всё множество теплофизических и физико-химических параметров, формирующих это покрытие.

В процессе настоящей работы в основу математического моделирования положены следующие допущения: толщина слоя смеси СВС постоянна по радиусу и по длине трубы; размер частиц смеси СВС намного меньше зоны реакции, что позволяет гетерогенную среду представить гомогенной; теплофизические параметры сред постоянны и не зависят от температуры; фронт волны горения распространяется в режиме устойчивого стационарного горения с постоянной скоростью. Для численного решения краевой задачи использовали метод конечных разностей.

Результаты теплофизического моделирования и построенная в ходе настоящей работы модель термокинетики процесса формирования внутритрубного покрытия были использованы для создания программы для ЭВМ, которая позволяет прогнозировать результаты проведения процесса в различных режимах. Интерфейс программы позволяет в широких пределах изменять значения термокинетических, механических и геометрических параметров процесса.

Ключевые слова: теплообмен, математическое моделирование, СВС-металлургия, центробежное СВС-литьё.

Совершенствование технологии получения композиционных слоистых металлокерамических труб с внешним металлическим и внутренним керамическим слоями с помощью реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), разработанной в 70-х годах прошлого века, до настоящего времени остаётся актуальной задачей. Стальные трубы, покрытые внутренним керамическим слоем, могут использоваться для транспортировки абразивных материалов в угольной и металлургической промышленности, теплоэнергетике и т. п., поскольку обладают устойчивостью к эрозии, коррозии, механическому износу, нагреву [1]. Однако технология получения таких труб при всей её перспективности нестабильна и её широкое внедрение невозможно без проведения работ по её оптимизации.

Разработке оптимальной методики получения покрытия, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям, будет способствовать создание математической модели процесса нанесения внутритрубного покрытия методом центробежного СВС, которая бы учитывала всё множество теплофизических и физико-химических параметров, формирующих это покрытие.

В работе [2] представлена методика, использовавшаяся для моделирования теплообмена меж-

ду стенкой трубы и смесью для СВС в процессе прохождения фронта горения вдоль трубы. В процессе моделирования предполагалось, что в элементарном сечении слоя смеси для СВС происходит полное превращение реагентов. Однако как показывают исследования особенностей горения конденсированных систем с тугоплавкими продуктами реакции [3], а также изучение образования волны горения в системах с распределенной функцией скорости тепловыделения [4], такое предположение следует уточнить, поскольку скорость распространения фронта горения принципиально связана с неполнотой превращения вещества.

Перепады температур в сечении, перпендикулярном поверхности контакта слоев, очень малы, поэтому можно считать, что температурное поле гетерогенной системы смеси для СВС одномерно. В зоне реакции содержится очень много мелких частиц, что позволяет усреднить тепловые характеристики и в некотором приближении рассматривать смесь как гомогенную. Ширина зоны химической реакции в волне горения больше размеров частиц, которые можно представить как точечные источники тепла. Это позволяет свести задачу о распространении пламени горения в гетерогенной системе к классической [3].

В настоящей работе теплофизические характеристики системы рассматриваются с учётом того, что реагенты плавятся и образуют в волне горения жидкий продукт. Появление жидкой фазы увеличивает скорость горения и приводит к реакционной диффузии реагентов. Реагенты могут плавиться как в зоне прогрева волны горения, так и в зоне реакции. Поэтому по температурному профилю волны горения можно установить протяженность жидкой фазы при известной температуре плавления реагентов, а также время пребывания ее в жидком состоянии. Под действием центробежных сил произойдет дифференциация компонентов жидкой фазы. Время перераспределения частиц по массе связано со временем пребывания в жидком состоянии продуктов горения смеси для СВС. В данном случае имеет место гетерогенный расплав, в котором взаимно нерастворимые металлическая и оксидная фазы имеют разные плотности. В таком расплаве под действием центробежной силы происходит фазоразделение – тяжелая фаза (металл) оседает на стенку трубы, легкая (оксиды) «всплывает» [5]. На этот процесс оказывает влияние температурное поле. При остывании увеличивается вязкость расплава и уменьшается скорость движения капель металла. Если время пребывания расплава в жидком состоянии больше времени фазоразделения, то оно успеет произойти. Полученное покрытие будет иметь хорошо разграниченные фазы: ближе к стенке трубы – металлическую и дальше от стенки – оксидную.

В процессе формирования внутритрубного покрытия методом СВС-металлургии по длине трубы образуются три области: сухой смеси СВС (порошка), жидкой и твердой фаз покрытия. По радиусу трубы имеются слои: стенка трубы, покрытие с подвижными границами фазовых переходов, порошок, жидкая и твердые фазы.

В целом установку для нанесения внутритрубного покрытия можно представить цилиндрическим объектом послойной структуры как по радиусу, так и по длине, и использовать методику математического моделирования термокинетических процессов, приведенную в работах [6, 7].

В процессе настоящей работы в основу математического моделирования положены следующие допущения: толщина слоя смеси СВС постоянна по радиусу и по длине трубы; размер частиц смеси СВС намного меньше зоны реакции, что позволяет гетерогенную среду представить гомогенной; теплофизические параметры сред постоянны и не зависят от температуры; фронт волны горения распространяется в режиме устойчивого, стационарного горения с постоянной скоростью.

С учетом принятых допущений уравнения энергии для стенки трубы, смеси, химической кинетики, начальные и граничные условия примут вид:

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

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

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

$$\text{где } \chi_{ct,s1} = \frac{\alpha_{ct,s1} P_{ct,s1}}{\rho_{ct} c_{ct} S_{ct}}; \chi_{ct,cm} = \frac{\alpha_{ct,cm} P_{ct,cm}}{\rho_{ct} c_{ct} S_{ct}};$$

$$\chi_{cm,s2} = \frac{\alpha_{cm,s2} P_{cm,s2}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{cm}}; \chi_{cm,ct} = \frac{\alpha_{cm,ct} P_{cm,ct}}{\rho_{cm} c_{cm} S_{cm}};$$

$$\varphi(\eta) = (1 - \eta)^y;$$

$T_{s1}, T_{s2}, T_{cm}, T_{ct}$ – температуры внешней окружающей среды, внутренней окружающей среды, смеси и стенки;

$\alpha_{ct,s1}, \alpha_{ct,cm}, \alpha_{cm,s2}, \alpha_{cm,ct}$ – коэффициенты теплоотдачи от стенки к внешней окружающей среде, от стенки к покрытию, от покрытия к внутренней окружающей среде и от покрытия к стенке;

$P_{ct,s1}, P_{ct,cm}, P_{cm,s2}, P_{cm,ct}$ – периметры раздела между стенкой и внешней окружающей средой, между стенкой и покрытием, между покрытием и внутренней окружающей средой и между покрытием и стенкой;

ρ_{ct}, ρ_{cm} – плотности стенки и покрытия;

c_{ct}, c_{cm} – удельные теплоемкости стенки и покрытия;

S_{ct}, S_{cm} – площади поперечного сечения стенки трубы и покрытия;

a_{ct}, a_{cm} – температуропроводности стенки и покрытия;

v_r – скорость продвижения фронта горения;

Q – мощность источника энергии;

S_{sa} – удельная поверхность раздела реагентов;

k_0 – предэкспоненциальный фактор;

E – энергия активации химической реакции;

R – газовая постоянная;

η – глубина химического превращения реагентов ($0 < \eta < 1$);

y – порядок;
 $\lambda_{ст}$, $\lambda_{см}$ – теплопроводность стенки трубы, покрытия.

Мощность источника энергии Q – тепловой эффект, полученный с помощью открытых баз данных FactSage (<http://www.crct.polymtl.ca/fact/>), который рассчитывался как сумма средневзвешенных значений тепловых эффектов реакций алюминия с оксидами, присутствующими в составе смеси.

Для численного решения краевой задачи (1)–(3) использовали метод конечных разностей. Систему (1) представили в дискретном блочно-матричном виде:

$$T_m^{n+1} = AT_{m-1}^n + BT_m^n + CT_{m+1}^n + DT_m^n + ET_s + \Theta, \quad (4)$$

$$\text{где } T_m^{n+1} = \begin{bmatrix} T_{стм}^{n+1} \\ T_{смм+1}^{n+1} \\ \eta_m^{n+1} \end{bmatrix}; T_{m+1}^n = \begin{bmatrix} T_{стм+1}^n \\ T_{смм+1}^n \\ \eta_{m+1}^n \end{bmatrix}; T_m^n = \begin{bmatrix} T_{стм}^n \\ T_{смм}^n \\ \eta_m^n \end{bmatrix};$$

$$T_{m-1}^n = \begin{bmatrix} T_{стм-1}^n \\ T_{смм-1}^n \\ \eta_{m-1}^n \end{bmatrix}; T_s = \begin{bmatrix} T_{s1} \\ T_{s2} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & D_1 & 0 \\ D_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 \end{bmatrix}; \Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix};$$

$$A_1 = \frac{\tau a_{ст}}{h^2}; B_1 = 1 - \tau \chi_{ст,с1} - \tau \chi_{ст,см} - \frac{2\tau a_{ст}}{h^2};$$

$$C_1 = \frac{\tau a_{ст}}{h^2}; D_1 = \tau \chi_{ст,см}; E_1 = \tau \chi_{ст,с1}; \theta_1 = 0;$$

$$A_2 = \frac{\tau a_{см}}{h^2} + \frac{\tau \nu_{\Gamma}}{2h}; B_2 = 1 - \tau \chi_{см,ст} - \tau \chi_{см,с2} - \frac{2\tau a_{ст}}{h^2};$$

$$C_2 = \frac{\tau a_{см}}{h^2} - \frac{\tau \nu_{\Gamma}}{2h}; D_2 = \tau \chi_{см,ст}; E_2 = \tau \chi_{см,с2};$$

$$\theta_2 = \frac{Q(S_{sa} k_0) e^{-\frac{E}{RT_{см}}}}{c_p \rho} \varphi(\eta);$$

$$A_3 = \frac{\tau \nu_{\Gamma}}{2h}; B_3 = 1 - S_{sa} k_0 e^{-\frac{E}{RT_{см}}}; C_3 = -\frac{\tau \nu_{\Gamma}}{2h};$$

$$D_3 = 0; E_3 = 0; \theta_3 = \tau S_{sa} k_0 e^{-\frac{E}{RT_{см}}} \varphi(\eta).$$

С учетом дискретных начальных и граничных условий (2), (3) система (4) примет вид:

$$\Theta_m^{n+1} = M \Theta_m^n + E_s \Theta_s + L, \quad (5)$$

$$\text{где } \Theta_m^{n+1} = \begin{bmatrix} T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ \vdots \\ T_{m-1}^{n+1} \\ T_m^{n+1} \end{bmatrix}; \Theta_m^n = \begin{bmatrix} T_1^n \\ T_2^n \\ \vdots \\ T_{m-1}^n \\ T_m^n \end{bmatrix}; \Theta_s = \begin{bmatrix} T_s \\ T_s \\ \vdots \\ T_s \\ T_s \end{bmatrix};$$

$$L = \begin{bmatrix} \Theta \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & \cdots & 0 \\ A & F & C & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & A & F & C \\ 0 & \cdots & \cdots & H_{m1} & H_{m2} \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} E & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & E & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & E & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & E \end{bmatrix};$$

$$F = B + D; H_{11} = A \cdot I_{11} + F; H_{12} = A \cdot I_{12} + C;$$

$$H_{m1} = A + C \cdot I_{21}; H_{m2} = F + C \cdot I_{22};$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{21} \\ 0 \end{bmatrix}; I_b = \begin{bmatrix} I_{12} \\ I_{22} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$I_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; I_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$I_{11} = \begin{bmatrix} \frac{2h\alpha_{ст,см}}{\lambda_{ст}} & \frac{2h\alpha_{ст,см}}{\lambda_{ст}} & 0 \\ \frac{2h\alpha_{см,ст}}{\lambda_{см}} & -\frac{2h\alpha_{см,ст}}{\lambda_{см}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$I_{22} = \begin{bmatrix} \frac{2h\alpha_{ст,см}}{\lambda_{ст}} & -\frac{2h\alpha_{ст,см}}{\lambda_{ст}} & 0 \\ -\frac{2h\alpha_{см,ст}}{\lambda_{см}} & \frac{2h\alpha_{см,ст}}{\lambda_{см}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Результаты теплофизического моделирования [2] и построенная в ходе настоящей работы модель термокинетики процесса формирования внутритрубного покрытия были использованы для создания (на языке C#) программы для ЭВМ, которая позволяет прогнозировать результаты проведения процесса в различных режимах. Интерфейс программы позволяет в широких пределах изменять значения термокинетических, механических и геометрических параметров процесса.

Примеры результатов такого моделирования представлены на рис. 1–3. Используемые исходные параметры приводятся в таблице.

Результаты компьютерного моделирования динамики формирования внутритрубного СВС-покрытия показывают, что в начальных сечениях

трубы степень выгорания смеси СВС мала вследствие низкой температуры стенки трубы и порошка смеси. В результате не произойдет фазо-разделения в жидком состоянии и, как следствие, не будет сформировано полноценное покрытие. Отсюда следует вывод о том, что воспламенение

Исходные данные

Параметры		Стенка (сталь)	Порошок	
Теплофизические	Плотность ρ , кг/м ³	7800	4000	
	Теплоемкость c , Дж/кг·К	500	1000	
	Теплопроводность a , Вт/К·м	47	1	
	Теплопередача α , Вт/К·м ²	внешняя среда	1000	1000
труба/смесь		1000	30000	
Геометрические	Внешний радиус трубы R_1 , м	0,15	–	
	Внутренний радиус трубы R_2 , м	0,145	0,145	
	Радиус слоя смеси СВС R_3 , м	–	0,095	
	Периметр раздела сред, м	внешняя среда	0,9425	0,599
		труба/смесь	0,911	0,911
Площадь сечения S , м ²	0,0046	0,0375		
Механические	Скорость вращения ω , об/мин	2000	2000	
	Скорость горения v , см/с	–	1	
Кинетические	Удельная поверхность раздела реагентов, м ²	–	0,1	
	Предэкспоненциальный фактор k	–	1	
	Энергия активации, Дж/моль	–	1000	

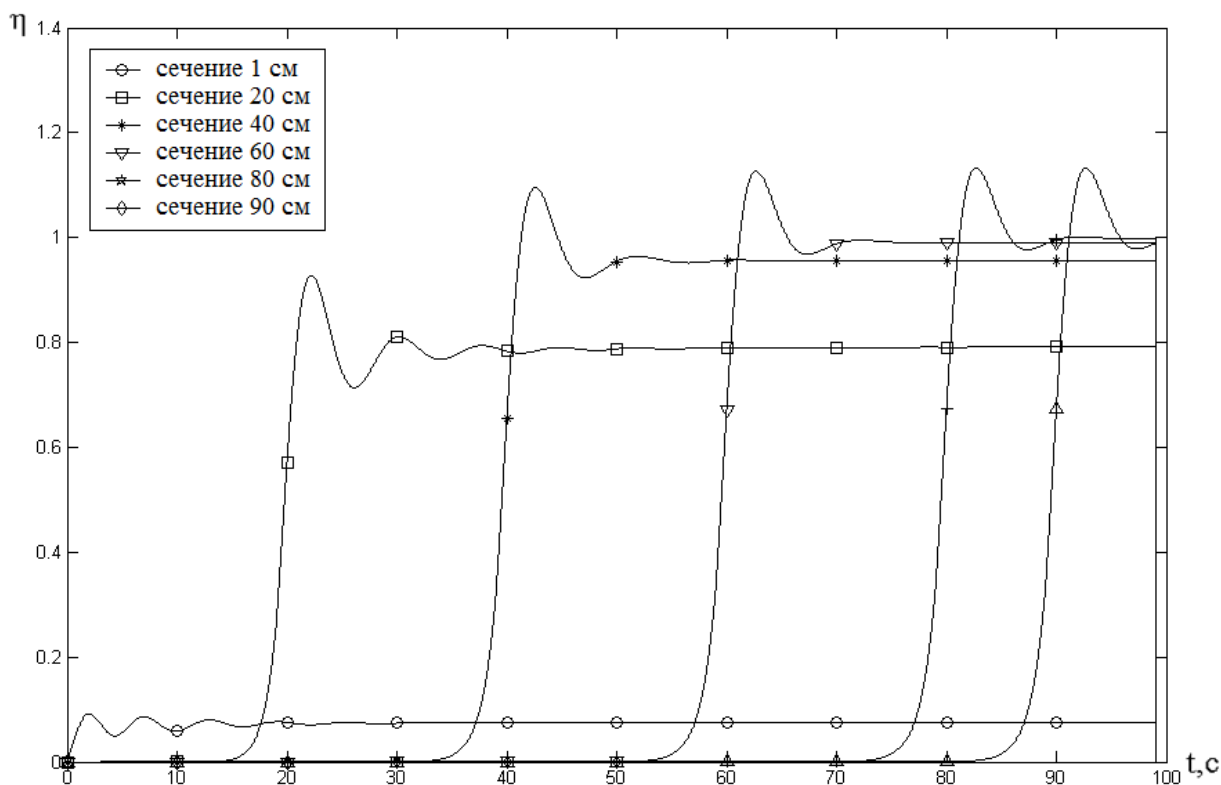


Рис. 1. Распределение степени выгорания смеси СВС по сечениям

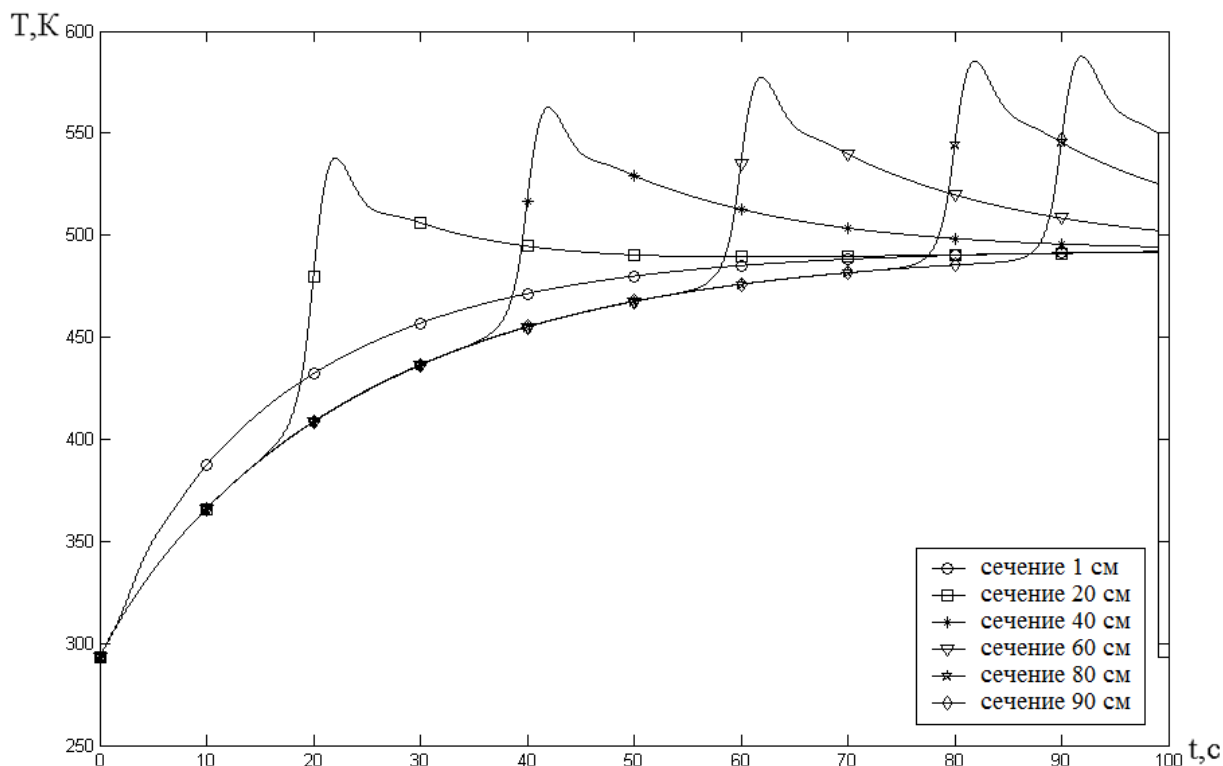


Рис. 2. Распределение температуры в стенке трубы по сечениям и времени

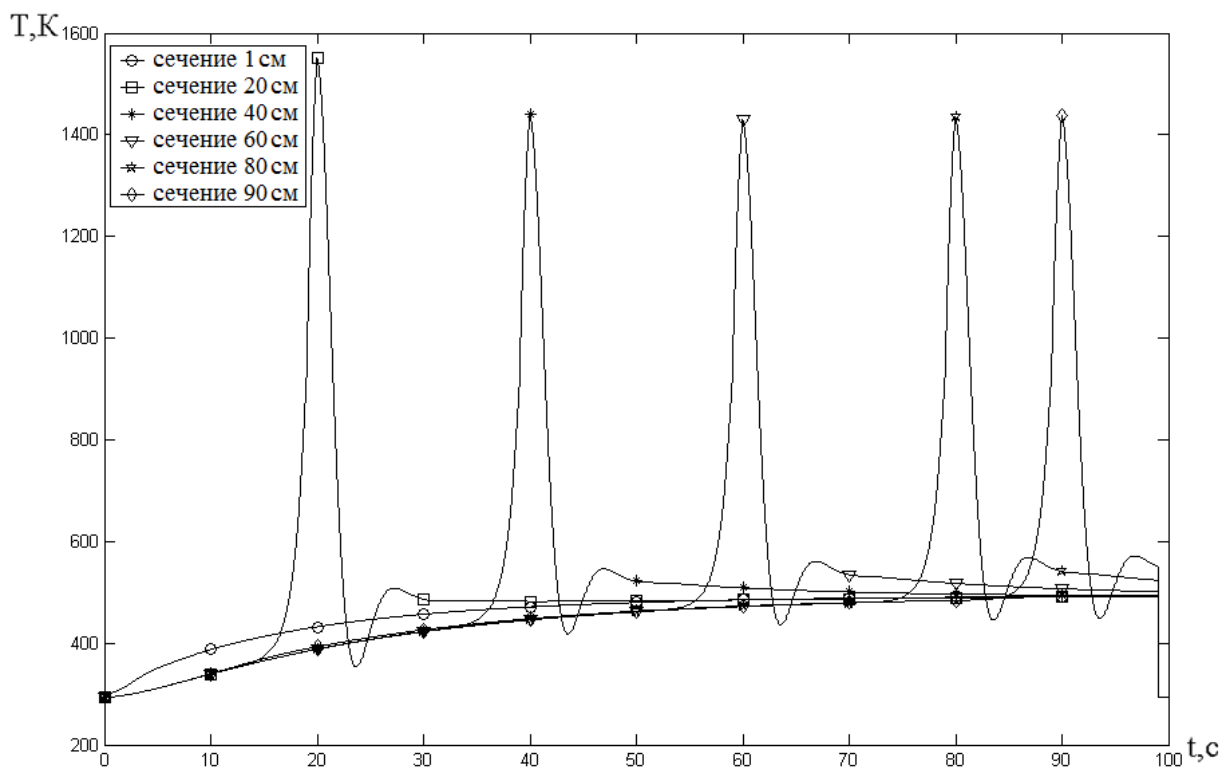


Рис. 3. Распределение температуры смеси СВС по сечениям и времени

смеси следует производить не в нулевом сечении трубы, а в некотором оптимальном, чтобы обеспечить формирование качественного покрытия в начальных сечениях.

Часть работы, связанная с термохимическими расчётами процесса СВС, выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-08-00545.

Литература

1. Санин, В.Н. СВС-металлургия труб с износостойким защитным покрытием с использованием техногенных отходов металлургических производств / В.Н. Санин, Д.Е. Андреев, В.И. Юхвид // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2011. – № 2. – С. 37–43.

2. Теплофизическое моделирование процесса нанесения внутритрубного покрытия методом центробежного СВС / Р.А. Садыков, В.И. Потапов, А.А. Ермоленко и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия». – 2013. – Т. 13, № 1 – С. 85–89.

3. Алдушин, А.П. О некоторых особенностях горения конденсированных систем с тугоплавкими продуктами реакции / А.П. Алдушин, А.Г. Мержа-

нов, Б.И. Хайки // Доклады АН СССР, 1972. – Т. 204, № 5. – С. 1139–1142.

4. Мержанов, А.Г. Твердопламенное горение / А.Г. Мержанов, А.С. Мукасян. – М.: Терус Пресс, 2007. – 336 с.

5. Юхвид, В.И. Закономерности фазоразделения в металлотермических процессах / В.И. Юхвид // Известия АН СССР. Сер. «Металлы», 1980. – № 6. – С. 61–64.

6. Мержанов, А.Г. Распространение твердо-го пламени в модельной гетерогенной системе / А.Г. Мержанов // Доклады РАН, 1997. – Т. 355, № 4. – С. 504–507.

7. Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами / Н.Д. Демиденко, В.И. Потапов, Ю.И. Шейкин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 551 с.

Садыков Руслан Артурович, инженер кафедры математики и вычислительной техники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте (г. Златоуст); ruslan-666@inbox.ru.

Потапов Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры математики и вычислительной техники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте (г. Златоуст); potapovvi@susu.ac.ru.

Любимова Анастасия Андреевна, лаборант кафедры математики и вычислительной техники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте (г. Златоуст); liubimovaaa@susu.ac.ru.

Трофимов Евгений Алексеевич, канд. хим. наук, доцент кафедры общей металлургии, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте (г. Златоуст); tea7510@gmail.com.

Поступила в редакцию 24 апреля 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Metallurgy”
2014, vol. 14, no. 3, pp. 48–54

MODELLING OF TEMPERATURE DISTRIBUTION DURING METAL-CERAMIC PIPE PRODUCTION USING A CENTRIFUGAL SHS METHOD

R.A. Sadykov, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russian Federation, ruslan-666@inbox.ru,

V.I. Potapov, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russian Federation, potapovvi@susu.ac.ru,

A.A. Lyubimova, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russian Federation, liubimovaaa@susu.ac.ru,

E.A. Trofimov, South Ural State University, Zlatoust Branch, Zlatoust, Russian Federation, tea7510@gmail.com

The improvement of the technology of the production of composite laminated metal-ceramic pipes with an external metal layer and an internal ceramic layer using reactions of self-propagating high temperature synthesis (SHS), developed in the 70-s of the last century up to the present time has been an urgent problem.

The technology though perspective is still unstable and its wide application is impossible without its optimization. The development of a mathematical model of the process of applying in-line coating using a centrifugal SHS method which would take into account all thermophysical and physicochemical parameters forming the coating could help the development of optimal methods of producing coatings which meet operational requirements.

The research is based on mathematical modeling and some assumptions: the layer thickness of the SHS mixture is constant in the radius and in the length of the pipe; the particle size of the SHS mixture is much less than the reaction zone (it allows to provide heterogeneous environment to homogeneous); thermophysical parameters of environments are constant and do not depend on the temperature; the length of the combustion wave propagates in stable, stationary combustion regime at a constant speed. The method of finite differences for making numerical calculations of the boundary value task. was used in this research.

The results of thermal simulation and the thermokinetic model of the in-line coating formation process built during the research were used to create a computer program that could predict the results of the process in different modes. The program interface allows to change the values of thermokinetic, mechanical and geometrical process parameters.

Keywords: heat transfer, mathematical modeling, SHS metallurgy, centrifugal SHS casting.

References

1. Sanin V.N., Andreev D.E., Yuxhvid V.I. Self-Propagating High-Temperature Synthesis Metallurgy of Pipes with Wear-Resistant Protective Coating with the Use of Industrial Wastes of Metallurgy Production. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2013, vol. 54, no. 3, pp. 274–279. doi: 10.3103/S1067821213030152.
2. Sadykov R.A., Potapov V.I., Ermolenko A.A., Trofimov E.A. [Thermophysical Modeling of Application-Tube Coating by Centrifugal SHS]. *Bull. of the South Ural St. Univ. Ser. Metallurgy*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 85–89. (in Russ.)
3. Aldushin A.P., Merzhanov A.G., Khaykn B.I. [On Some Peculiarities of Combustion of Condensed Systems with Refractory Reaction Products]. *Doklady AN SSSR*, 1972, vol. 204, no. 5, pp. 1139–1142. (in Russ.)
4. Merzhanov A.G., Mukas'yan A.S. *Tverdoplamennoe gorenje* [Solid-Burning]. Moscow, Terus Press Publ., 2007. 336 p.
5. Yuxhvid V.I. [Regularities of Phase Separation in Metallothermic Processes]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Metallurgy*, 1980, no. 6, pp. 61–64. (in Russ.)
6. Merzhanov A.G. [Solid Flame Spread Model in a Heterogeneous System]. *Doklady RAN*, 1997, vol. 355, no. 4, pp. 504–507. (in Russ.)
7. Demidenko N.D., Potapov V.I., Sheykin Yu.I. *Modelirovanie i optimizatsiya sistem s raspredelennymi parametrami* [Modeling and Optimization of Systems with Distributed Parameters]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 551 p.

Received 24 April 2014