



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Шосткинський інститут Сумського державного університету
Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних сил України
Державне підприємство
«Державний науково-дослідний інститут хімічних продуктів»
Виконавчий комітет Шосткинської міської ради
Казенне підприємство «Шосткинський казенний завод «Імпульс»
Казенне підприємство «Шосткинський казенний завод «Зірка»

ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ: НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО

МАТЕРІАЛИ
III Міжнародної
науково-практичної конференції
(м. Шостка, 23-25 листопада 2016 року)



УДК 66.015.23:669.112

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ
УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ УПЛОТНЕНИИ МЕТОДОМ ТЕРМОГРАДИЕНТА**
В.А. Скачков, В.И. Иванов, Т.Н. Нестеренко, Ю.В. Мосейко

Запорожская государственная инженерная академия
69006, г. Запорожье, пр. Соборный, 226
colourmet@zgia.zp.ua

Свойства углеродных композиционных материалов определяются структурой материала, которая характеризуется расположением армирующих волокон, их объемным содержанием и пористостью. Повышение плотности данных материалов достигается заполнением их пористой структуры пиролитическим углеродом с применением методов газофазного уплотнения. К числу газофазных методов относятся изотермическое и термоградиентное уплотнение [1,2].

В работе изучали формирования плотности углеродных композиционных материалов в условиях термоградиентного метода уплотнения, который характеризуется переменным температурным полем по их толщине.

Углеродный композиционный материал представляли в виде пластины толщиной δ с цилиндрическими порадами, имеющими эффективный радиус $r_{\text{эф}}$ и направленными перпендикулярными к поверхности материала. При этом, поверхность материала с координатой $x = 0$ нагрета до температуры T_B , а поверхность с координатой $x = \delta$ омывается реакционным газом (метаном) с температурой T_G .

Распределение температуры по толщине пластины описывали одномерным дифференциальным уравнением теплопроводности с соответствующими краевыми условиями

$$c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial (\lambda \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} \quad (1)$$

Уравнение (1) дополняли краевыми условиями:

$$T(x = 0) = T_B ; \quad (2)$$

$$[\lambda (\frac{\partial T}{\partial x})] (x = \delta) = \alpha \cdot (T_H - T_G) ; \quad (3)$$

$$T(0, x) = T_0 \quad (4)$$

где c – теплоемкость углеродного композиционного материала, кДж/(кг·К); ρ – плотность углеродного композиционного материала, г/м³; T , T_0 – начальная и текущая температура композиционного материала, К, соответственно; x , τ – текущие линейная, м, и временная координаты, с, соответственно; λ – коэффициент теплопроводности композиционного материала, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопроводности углеродного композиционного материала, зависящий от изменения его пористости, с учетом результатов работы [3] можно записать в виде соотношений

$$\lambda = \lambda_k \cdot \rho_0 / \rho + \lambda_{\text{пу}} \cdot (1 - \rho_0 / \rho), \quad (5)$$

где λ_k , $\lambda_{\text{пу}}$ – коэффициент теплопроводности пористого композиционного материала и пиролитического углерода, Вт/(м·К), соответственно; ρ_0 – начальная массовая плотность пористого композиционного материала, кг/м³.

Уравнение (1) с учетом соотношения (5) имеет вид:

$$c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \rho_0 / \rho \cdot [\lambda_k (\frac{\partial \rho}{\partial l} \cdot \frac{\partial T}{\partial l}) + \lambda_p \frac{\partial^2 T}{\partial l^2}], \quad (6)$$

где $\lambda_p = \lambda_k - \lambda_{\text{пу}} \cdot (1 - \rho_0 / \rho)$.

Задачу о диффузии реакционного газа в пору с учетом его разложения на ее поверхности и образования пиролитического углерода представляли в виде системы уравнений

$$1/D \cdot \partial C/\partial \tau = \partial^2 C/\partial x^2 + \theta \cdot \partial C/\partial x - 2k/r_{эф} \cdot D \cdot \exp [(-E/R \cdot T) \cdot \exp (\psi \cdot x) - 1,5 \psi \cdot x] \cdot C = 0 \quad (7)$$

$$C(\tau) (x = \delta) = C^{II}; \quad (8)$$

$$C(x, 0) = C^{II}; \quad (9)$$

$$-D_H \cdot \partial C/\partial x = \beta_m \cdot (C^{II} - C_0), \quad (10)$$

где C_0 – концентрация реакционного газа (метана) в реакторе, $\text{кг}/\text{м}^3$; C , C^{II} – концентрация метана в поре и возле поверхности композиционного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$, соответственно; D – коэффициент диффузии реакционного газа, $\text{м}^2/\text{с}$; β_m – коэффициент скорости массопередачи, $\text{м}/\text{с}$; E – энергия активации образования пиролитического углерода, $\text{кДж}/\text{кг}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; $\psi = 1/\delta \cdot \ln (T_B/T_H)$; D_H – коэффициент диффузии реакционного газа при температуре T_H , $\text{м}^2/\text{с}$.

Изменение плотности по толщине углеродного композиционного материала описывали уравнением

$$-\vartheta \cdot d\rho/dx = k \cdot S_i \cdot C \quad (11)$$

с граничным условием

$$\rho (x = \delta) = \rho_0. \quad (12)$$

где ϑ – скорость роста пиролитического углерода, $\text{м}/\text{с}$; k – константа скорости образования пиролитического углерода, $\text{м}/\text{с}$.

Удельная реакционная поверхность пор углеродного композиционного материала определяется соотношением

$$S_i = 2(\rho_u - \rho)/r_{эф} \cdot \rho_u \cdot \rho \quad (13)$$

После подстановки выражения (13) в уравнение (11) получают

$$-\vartheta \cdot d\rho/dx = 2(\rho_u - \rho) \cdot k \cdot C/r_{эф} \cdot \rho_u \cdot \rho \quad (14)$$

где ρ_u – истинная массовая плотность углеродного композиционного материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Решение системы уравнений (1)-(14) осуществляли численными методами. Алгоритм расчета обеспечивает определение распределения температуры по толщине уплотняемого углеродного композиционного материала, изменения концентрации реакционного газа по толщине стенки данного материала и его плотности.

Тестовые расчеты выполняли для природного газа следующего состава: 96,30 % CH_4 ; 0,50 % C_2H_6 ; 0,35 % C_3H_8 ; 0,05 % C_4H_{10} ; 2,0 % H_2 ; 0,80 % N_2 при начальной плотности карбонизованного углепластика $\rho_0 = 1,09 \text{ г}/\text{см}^3$.

Установлено, что в центральной части углеродного композиционного материала плотность на 3...4 % ниже, чем в области обеих поверхностей, а распределение плотности по его толщине соответствует результатам работы [2].

Результаты экспериментальных исследований процесса уплотнения углеродных композиционных материалов в среде метана подтвердили достаточную точность разработанной модели.

Литература

1. Скачков В.А. Анализ методов газофазного уплотнения пористых углерод-углеродных композиционных материалов / В.А. Скачков // *Металлургия : труды Запорожской государственной инженерной академии*. Запорожье : РИО ЗГИА, 2003. Вып. 7. С. 70-77.
2. Гурин В.А. Газофазные методы получения углеродных и углерод-углеродных материалов / В.А. Гурин, В.Ф. Зеленский // *Вопросы атомной науки и техники*. Харьков: ННЦ «ХФТИ», 1999. Вып. 4 (76). С. 23-31.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен / *Справочник*. А.В. Лыков. М. : Энергия, 1971. 560 с.