

## ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СВС В РЕЖИМЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА

В. Ю. Филимонов, К. Б. Кошелев

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, 656038 Барнаул  
vyfilimonov@rambler.ru

Методами математического моделирования в работе исследованы особенности формирования температурных и концентрационных полей при синтезе в режиме теплового взрыва в цилиндрическом реакторе. Расчет проведен с учетом плавления одного из компонентов, являющегося химически активным, в приближении отсутствия растворимости тугоплавкого компонента в расплаве легкоплавкого. Показано, что условия полного превращения исходных компонентов в объеме реагирующей смеси зависят от соотношения критерия Био системы, температуры окружающей среды и теплового эффекта реакции. Установлено, что после реализации теплового взрыва, который происходит при достижении фронтом плавления геометрического центра реактора, формируется фронт полного превращения, который движется от оси цилиндра к периферии, при этом скорость его движения замедляется. Рассчитана диаграмма критических значений критерия Био, при которых происходит полное выгорание компонентов во всем реакционном объеме.

Ключевые слова: тепловой взрыв, высокотемпературный синтез, реакционная диффузия, глубина превращения, теплоотвод.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интерес исследователей в области фундаментального и прикладного материаловедения к проблемам так называемого технологического горения [1] значительно возрос. Это определяется возрастанием уровня требований к эксплуатационным характеристикам композиционных материалов и изделий, применяемых в различных отраслях машиностроения. Одной из главных задач технологического горения является выбор режимов синтеза с целью получения продукта требуемого состава и свойств. В связи с этим усилился интерес к способам реализации СВС в режиме теплового взрыва [2, 3], при котором возможно управление процессом посредством изменения внешних условий [4, 5]. С этой точки зрения одним из важных аспектов технологического горения является получение монофазного продукта синтеза во всем объеме реагирующей смеси. В работе [6] методами математического моделирования показано, что процесс теплового взрыва при любых значениях параметров (как внутренних, характеризующих кинетику тепловыделения, так и внешних, характеризующих энергообмен с окружающей средой) сопровождается формированием фронта горения, который определяется неоднородностью полей

температуры и глубины превращения за индукционный период. Таким образом, формирование структуры и фазового состава конечного продукта во многом определяется динамикой индукционных процессов. Вместе с тем большинство гетерогенных систем взаимодействует при наличии жидкой фазы, являющейся химически активным компонентом (это не учитывается в работе [6], поэтому результаты расчета по этой модели справедливы, например, и для газовзвесей). В таком случае необходим учет динамики плавления при прогреве смеси, если характерные времена разогрева и плавления сопоставимы (см. классические работы [7, 8]), в противном случае плавление предшествует теплового взрыву. Расчет динамики формирования температурных и концентрационных полей позволит ответить на вопрос о фазовом составе конечного продукта в прореагировавшем объеме смеси.

Для более глубокого понимания взаимосвязи кинетики фазообразования и кинетики формирования тепловых структур необходимо учитывать реальные процессы, происходящие в объеме элементарной ячейки (диффузия, растворение, диффузионная перекристаллизация и т. п.), определяемые спецификой диаграммы состояния системы. В этом отношении использование эффективных кинетических функций

[6, 9] хотя и носит в известной степени универсальный характер, лишь схематически описывает реальный процесс, поскольку не учитывает особенности взаимодействия конкретной системы, которые в свою очередь определяются структурой диаграммы состояния. В данной работе рассматривается взаимодействие в гетерогенных системах, характеризуемых диаграммой состояния с конгруэнтно плавящейся промежуточной фазой со слабой растворимостью тугоплавкого компонента в расплаве легкоплавкого. Целью исследования являлось выяснение закономерностей формирования продукта синтеза в условиях нестационарных полей температуры в объеме реактора цилиндрической формы с учетом плавления легкоплавкого компонента и условий образования монофазного продукта в объеме реагирующей смеси при реализации синтеза в режиме теплового взрыва.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассматривался класс бинарных систем, для которых растворимость твердой фазы в жидкой мала и процесс структурообразования проходит преимущественно по механизму реакционной диффузии. При этом в объеме твердой фазы формируются интерметаллидный слой и твердый раствор. Максимальные температуры синтеза ниже температуры плавления тугоплавкого компонента и температуры плавления продукта, ширина области гомогенности промежуточной фазы не зависит от температуры, по крайней мере до момента достижения системой максимальной температуры. Реагирующая смесь находится в цилиндрическом реакторе, температура внешней поверхности стенки которого постоянна и превышает температуру плавления легкоплавкого компонента. Радиус реакционной ячейки значительно меньше радиуса цилиндра. Таким образом, задача формулировалась как двухуровневая.

На «внешнем» уровне задача теплопроводности формулировалась для цилиндрического реактора с внутренним радиусом  $R_1$  и внешним радиусом  $R_2$  для трех характерных областей (рис. 1): 1 — исходная шихта в твердой фазе, в этой области реакции синтеза не происходит; 2 — область реагирования расплава с твердофазным компонентом; 3 — стенка цилиндра, на внешней границе стенки ставилось граничное условие третьего рода.

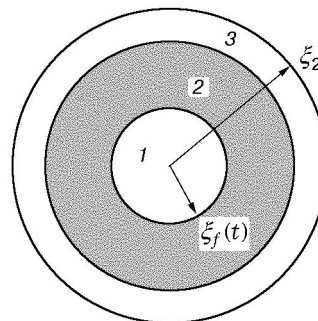


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая постановку задачи на «внешнем» уровне:

1–3 — характерные области для уравнений теплопроводности,  $\xi = r/R_1$  — безразмерный радиус,  $R_1$  — внутренний радиус цилиндрического реактора,  $\xi_f(t)$  — радиус фронта плавления,  $\xi_2 = R_2/R_1$ ,  $R_2$  — внешний радиус

На «внутреннем» уровне рассматривалась диффузия жидкой фазы в области интерметаллида и твердого раствора (рис. 2). При отсутствии растворимости твердой фазы в расплаве легкоплавкого компонента его концентрация в области  $l$  остается неизменной. В процессе диффузии границы раздела областей перемещаются, что обуславливает процесс фазообразования в ячейке. Необходимо иметь в виду, что под концентрациями  $C_1, C_2, C_3$  подразумеваются эффективные концентрации с учетом

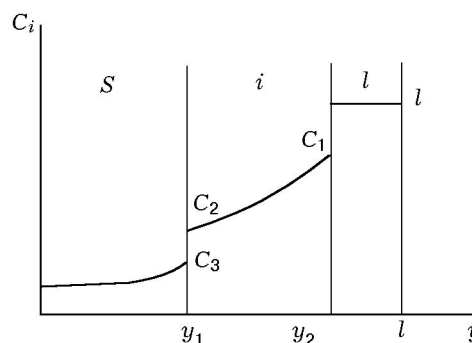


Рис. 2. Схематическое представление распределения концентрации легкоплавкого компонента в объеме ячейки («внутренний» уровень):

$l$  — жидкая фаза без растворенного металла,  $i$  — интерметаллид,  $s$  — твердый раствор,  $C_1$ – $C_3$  — относительные концентрации границ областей гомогенности фазы и растворов,  $y_1, y_2$  — границы раздела областей, зависящие от времени,  $y = x/R_e$ ,  $x$  — текущий радиус,  $R_e$  — радиус ячейки

стефановского потока [8, 10–13]. Рассмотренный подход к моделированию процессов структурообразования является более детальным и информативным, чем при введении в рассмотрение законов кинетического торможения.

Очевидно, что динамика перемещения границ областей гомогенности будет определяться значением коэффициентов диффузии легкоплавкого компонента в фазе и твердом растворе. Размер ячейки  $R_e$  (определяющий соотношение объемов расплава и твердой фазы) находился из условия ее заполнения конечным продуктом состава  $C_2$ .

Исходя из вышеизложенного математическая формулировка задачи в безразмерных переменных записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \delta_1 \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \xi \frac{\partial \Theta_1}{\partial \xi} \quad (0 < \xi < \xi_f), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \xi \frac{\partial \Theta_2}{\partial \xi} + \varkappa \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{y_1}^{y_2} C_i(y) y^2 dy \quad (\xi_f < \xi < 1), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \delta_3 \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \xi \frac{\partial \Theta_3}{\partial \xi}, \quad (1 < \xi < \xi_2), \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \gamma_i \exp\left(\frac{\Theta_2}{1 + \beta_i \Theta_2}\right) \frac{1}{y^2} \frac{\partial}{\partial y} y^2 \frac{\partial C_i}{\partial y} \quad (y_2 < y < y_1), \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial \tau} = \gamma_s \exp\left(\frac{\Theta_2}{1 + \beta_s \Theta_2}\right) \frac{1}{y^2} \frac{\partial}{\partial y} y^2 \frac{\partial C_s}{\partial y} \quad (0 < y < y_2). \quad (5)$$

Здесь (1)–(3) — уравнения теплопроводности для областей 1–3 (см. рис. 1), с источником тепловыделения для области 2; (4), (5) — уравнения диффузии легкоплавкого компонента в области формирующегося интерметаллидного слоя и твердого раствора. Значения безразмерных параметров:  $\Theta = E_i(T - T_l)/RT_l^2$  — безразмерная температура,  $E_i$  — энергия активации диффузии в области интерметаллида,  $T_l$  — температура плавления легкоплавкого компонента,  $\tau = t/t_r$ , где  $t_r = R_1^2/a_2$  — время тепловой релаксации в области 2,  $a_2$  — коэффициент температуропроводности в области 2,

$\delta_1 = a_1/a_2$ ,  $\delta_2 = a_3/a_2$  — отношение коэффициентов температуропроводности в соответствующих областях,  $\varkappa = 3\rho_l Q E_l / (RT_l^2 c_2 \rho_2)$ , где  $\rho_l$  — плотность жидкой фазы,  $Q$  — тепловой эффект образования интерметаллида,  $c_2$  и  $\rho_2$  — эффективные теплоемкость и плотность в области 2,  $\gamma_i = \left(\frac{R_1}{R_e}\right)^2 \frac{D_{i0}}{a_2} \exp\left(-\frac{E_i}{RT_l}\right)$ ,  $\gamma_s = \left(\frac{R_1}{R_e}\right)^2 \frac{D_{s0}}{a_2} \exp\left(-\frac{E_s}{RT_l}\right)$ ,  $D_{i0}$ ,  $D_{s0}$  — предэкспоненты для коэффициентов диффузии в области интерметаллида и твердого раствора,  $E_i$ ,  $E_s$  — соответствующие им энергии активации диффузии,  $\beta_i = RT_l/E_i$ ,  $\beta_s = RT_l/E_s$ .

Краевые условия для уравнений (1)–(3):

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad \Theta &= -\Theta_0, \\ \xi = \xi_2: \quad \frac{\partial \Theta_3}{\partial \xi} &= -\text{Bi}(\Theta_3 - \Theta^*); \\ \xi = 1: \quad \Theta_3 &= \Theta_{1,2}, \quad \frac{\partial \Theta_3}{\partial \xi} = b_{1,2} \frac{\partial \Theta_{1,2}}{\partial \xi}, \\ \xi = \xi_f: \quad \omega \frac{d\xi}{d\tau} &= b_3 \frac{\partial \Theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi_f-0} - \frac{\partial \Theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi_f+0}, \\ \Theta_1 &= \Theta_2 = 0, \\ \xi = 0: \quad \frac{\partial \Theta_1}{\partial \xi} &= \frac{\partial \Theta_2}{\partial \xi} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Theta_{1,2} &= \begin{cases} \Theta_1, & \Theta(1) < 0, \\ \Theta_2, & \Theta(1) > 0, \end{cases} \\ b_{1,2} &= \begin{cases} \lambda_1/\lambda_3, & \Theta(1) < 0, \\ \lambda_2/\lambda_3, & \Theta(1) > 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Уравнения для расчета динамики движения границ областей гомогенности имеют вид:

$$\begin{aligned} y = y_2, \quad C_i &= C_1; \quad y = y_1, \quad C_i = C_2, \quad C_s = C_3; \\ y = 0, \quad \frac{\partial C_i}{\partial y} &= \frac{\partial C_s}{\partial y} = 0, \\ (1 - C_1) \frac{dy_2}{d\tau} &= \gamma_i \frac{\partial C_i}{\partial \tau} \Big|_{y_2-0}, \\ (C_2 - C_3) \frac{dy_1}{d\tau} &= \gamma_s \frac{\partial C_s}{\partial y} \Big|_{y_2-0} - \gamma_i \frac{\partial C_i}{\partial y} \Big|_{y_2+0}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$y_1(0) = y_2(0) = y_0 = \frac{r_0}{R_e}, \quad y = 1, \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0.$$

В (6), (7) приняты следующие обозначения:  $Bi = \alpha R_1 / \lambda_3$  — критерий Био системы,  $\Theta^*$  — температура окружающей среды,  $\alpha$  — эффективный коэффициент теплоотдачи,  $\lambda_{1-3}$  — коэффициенты теплопроводности в соответствующих областях,  $\omega = \rho_l L E a_2 / \lambda_2 R T_l^2$ ,  $L$  — удельная теплота плавления легкоплавкого компонента,  $b_3 = \lambda_1 / \lambda_2$ . Целью расчета по уравнениям (1)–(7) являлось выяснение особенностей саморазогрева и формирования продукта синтеза в процессе теплового взрыва, а также условий получения монофазного продукта в объеме цилиндрического реактора в зависимости от внешних условий проведения синтеза.

Для численного решения задачи в области  $\xi$  строилась конечно-разностная сетка, в каждом узле которой сетка в области  $y$ . Алгоритм численного расчета на одном временном шаге следующий.

1. Для узлов области  $\xi$ , в которых выполняется условие  $\Theta > 0$ , решаются уравнения диффузии. 1.1. В соответствии с (7) по явным формулам рассчитываются границы фаз на следующем временном шаге.

1.2. Методом прогонки находятся значения концентраций на следующем временном шаге. При этом коэффициенты уравнений, содержащие  $\Theta$ , используются явно.

2. Методом прогонки решается уравнение для расчета распределения температуры. Скорость движения границы  $\Theta = 0$  аппроксимируется добавлением разностного аналога  $\delta$ -функции в уравнение теплопроводности [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Анализ системы (1)–(5) позволил установить, что полнота выгорания системы по радиусу цилиндрического реактора наиболее существенно зависит от параметров  $Bi$ ,  $\Theta^*$ ,  $\omega$ ,  $\Delta C = C_1 - C_2$  и  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ . Первые два являются управляющими макропараметрами и определяют теплоотвод и температуру окружающей среды. Остальные четыре параметра определяют тепловыделение и диффузионную кинетику процесса и характеризуют рассматриваемую бинарную систему. Основной задачей настоящего исследования являлось выяснение взаимосвязи параметров  $Bi$ ,  $\Theta^*$ ,  $\omega$  на пределе

полного выгорания компонентов в объеме цилиндрического реактора. Для расчета по уравнениям (1)–(6) значения фиксированных параметров выбирались следующими:  $\delta_1 = 0.5$ ,  $\delta_2 = 10$ ,  $\Theta_0 = -16$ ,  $\xi_2 = 1.01$ ,  $\omega = 1$ ,  $b_1, b_2, b_3 = 1$ ,  $C_1 = 0.7$ ,  $C_2 = 0.6$ ,  $C_3 = 0.2$ ,  $\gamma_i = 10^{-5}$ ,  $\gamma_s = 10^{-4}$ ,  $r_0 / R_e = 0.89$ .

На рис. 3 представлены результаты расчета при  $Bi = 10$ . На диаграмме фазообразования область выше кривых, полученных при  $y > 0.89$ , соответствует жидкой фазе, ниже кривых, полученных при  $y < 0.89$ , — твердому раствору. Область между кривыми — синтезированная фаза. Из представленных зависимостей следует, что в процессе саморазогрева температура за фронтом плавления растет, при этом формируется низкотемпературная волна горения, по ширине которой идет процесс фазообразования с невысокой глубиной превращения. В момент достижения фронтом плавления геометрического центра реактора наблюдается быстрый рост температуры (тепловой взрыв), сопровождаемый скачкообразным изменением глубины выгорания в центре. Далее, в процессе охлаждения системы, фронт полного превращения движется к периферии цилиндра, при этом скорость фронта замедляется. В зависимости от теплофизических параметров задачи либо происходит полное выгорание компонентов по радиусу цилиндра, либо фронт полного превращения останавливается и имеет место неполное выгорание, в области интерметаллида сохраняются градиенты концентрации легкоплавкого компонента, система в неравновесном состоянии.

На рис. 4 представлены результаты расчета при  $\Theta^* = 3$ ,  $\omega = 100$ ,  $Bi = 0.1$ . В данном случае полное выгорание в объеме смеси соответствует достижению системой максимальных температур, процесс остывания происходит в объеме прореагировавшего продукта. Более однородным профилям температуры соответствуют более высокие скорости превращения.

На рис. 5 приведены зависимости глубины превращения на внутренней поверхности стенки реактора ( $\xi = 1$ ) от параметра  $\omega$ . Из характера зависимостей следует, что при меньших значениях критерия Био зависимость глубины превращения от параметра  $\omega$  более сильная, чем при больших. Последнее легко объяснить тем, что уменьшение теплоотвода приводит к тому, что успевает выгореть большая часть ис-

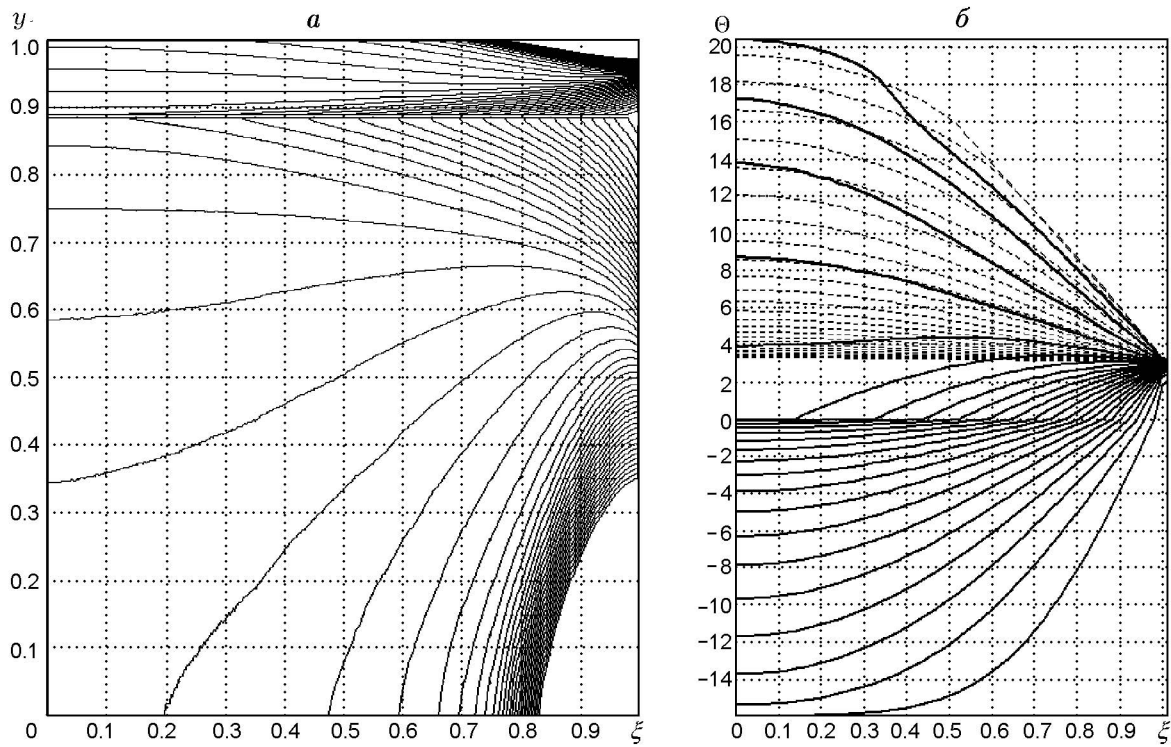


Рис. 3. Динамика развития теплового взрыва при  $\Theta^* = 3$ ,  $\alpha = 100$ ,  $Vi = 10$ :  $a$  — динамика фазообразования,  $b$  — динамика температурных профилей: сплошные линии — саморазогрев, пунктирные — остывание; шаг по времени  $\Delta\tau = 0.1$

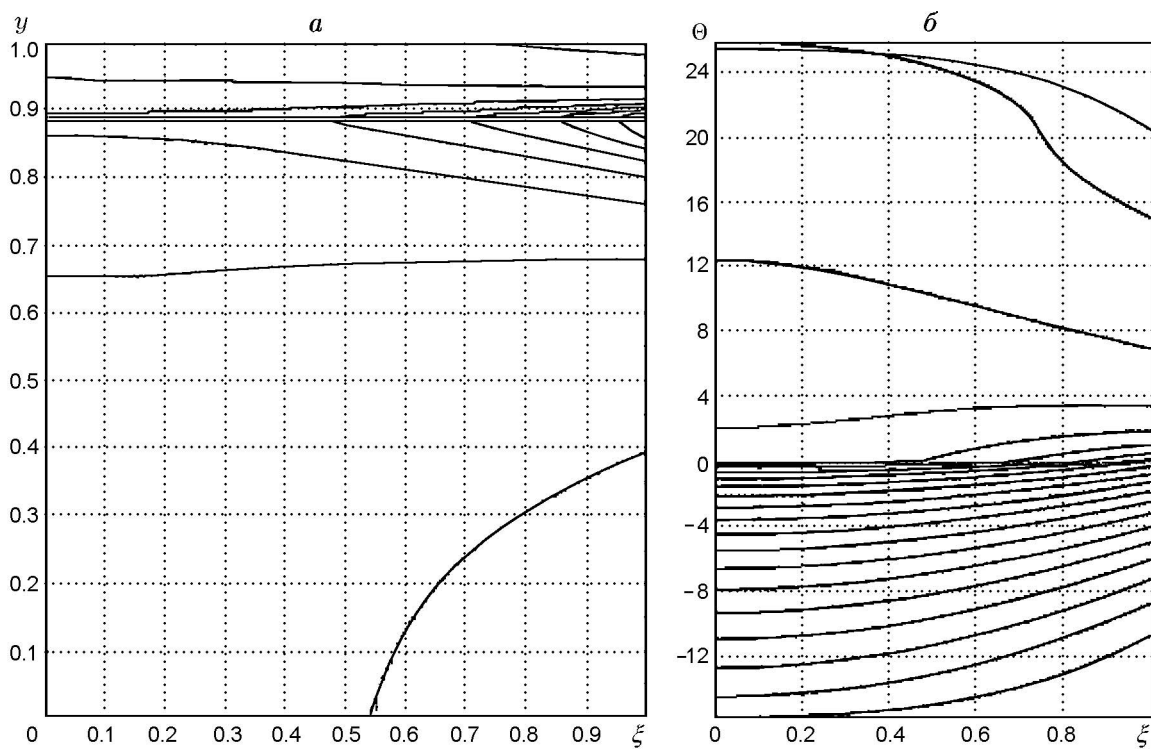


Рис. 4. Динамика развития теплового взрыва при  $\Theta^* = 3$ ,  $\alpha = 100$ ,  $Vi = 0.1$ :  $a$  — динамика фазообразования,  $b$  — динамика температурных профилей; шаг по времени  $\Delta\tau = 0.1$

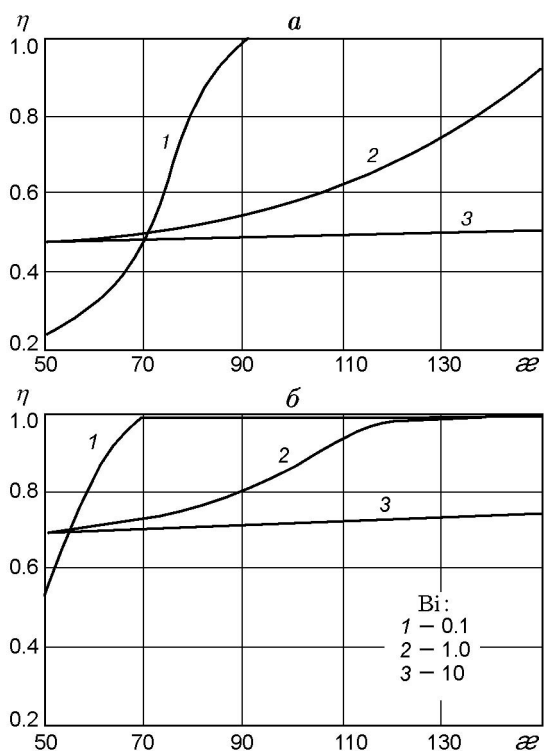


Рис. 5. Зависимость глубины превращения в ячейке на внутренней поверхности реактора ( $\xi = 1$ ) от параметра  $\alpha$  при  $\Theta^* = 2$  (а) и 3 (б)

ходных компонентов, поскольку система охлаждается медленнее.

На рис. 6 представлены зависимости координаты фронта полного превращения от параметра  $\alpha$  при различных значениях критерия Био к моменту выравнивания температуры смеси и стенки реактора. Очевидно, что при малых значениях  $Bi$  возможны режимы неполного превращения во всем объеме (рис. 6, а, кривая 1). В этом случае процесс фазообразования не проходит до конца на оси реактора и фронт полного превращения не формируется. В такой ситуации легко управлять глубиной превращения в объеме, изменяя температуру окружающей среды. Тот факт, что движение фронта полного превращения от центра к периферии при меньших значениях  $Bi$  начинается позже, чем при больших, можно объяснить тем, что малость критерия Био обуславливает более однородное распределение формирующейся фазы по радиусу цилиндра. При больших значениях  $Bi$  зависимость глубины превращения от радиуса (см. рис. 3, 4) выражена более ярко (наклон кривой  $y(\xi)$  в центре больше). Следо-

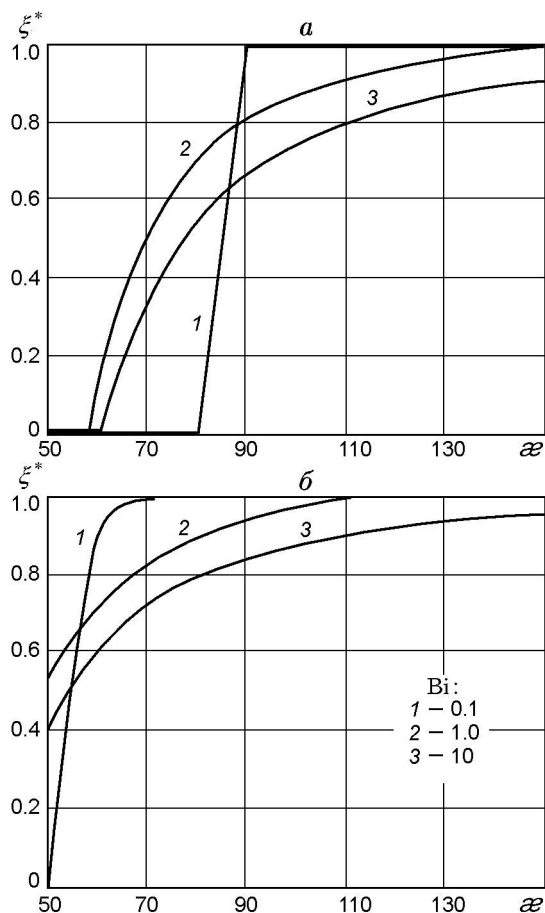


Рис. 6. Зависимость координаты фронта полного превращения  $\xi^*$  по радиусу цилиндра от параметра  $\alpha$  при  $\Theta^* = 2$  (а) и 3 (б) и различных значениях числа Био к моменту выравнивания температур смеси и стенки реактора

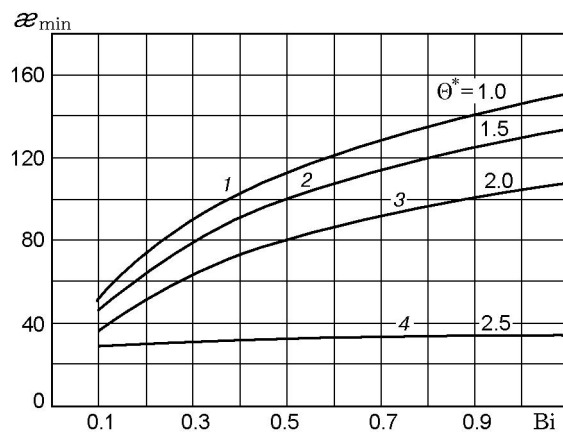


Рис. 7. Зависимость минимального значения параметра  $\alpha$ , при котором происходит полное выгорание компонентов по радиусу цилиндра, от критерия Био при различных значениях температуры окружающей среды

вательно, в этом случае движение фронта полного превращения от центра начнется раньше, однако с меньшей скоростью вследствие более быстрого охлаждения системы из-за большего теплоотвода.

На рис. 7 приведены зависимости минимального значения  $\alpha_{\min}$ , при котором еще происходит полное выгорание компонентов по радиусу реактора, от критерия Био при различных значениях температуры окружающей среды. Кривые разделяют области значений параметров полного и неполного выгорания. При  $\alpha > \alpha_{\min}$  наблюдается полное выгорание в объеме реактора. В противном случае выгорание неполное,  $\xi^* < 1$  и при  $\xi^* < \xi < 1$  глубина превращения является распределенной величиной. При  $Bi \gg 1$  параметр  $\alpha_{\min}$  стремится к постоянному значению, поскольку происходит переход к граничному условию первого рода. Рост температуры окружающей среды приводит к уменьшению значения  $\alpha_{\min}$  вследствие того, что недостаток тепловыделения от реакции, необходимого для полного выгорания в объеме смеси, компенсируется внешним подводом энергии.

В заключение необходимо заметить, что задача (1)–(6) является многопараметрической. Вопрос о влиянии диффузионной кинетики синтеза (параметров бинарной системы  $C_1, C_2, C_3, \gamma_1, \gamma_2$ ), динамики плавления (параметр  $\omega$ ), теплофизических характеристик порошковой системы и материала стенки (параметры  $b_1, b_2, b_3, \delta_1, \delta_3$ ) требует отдельного исследования.

## ВЫВОДЫ

При реализации СВС в режиме теплового взрыва при наличии фазового превращения взрыв происходит по достижении фронтом плавления геометрического центра цилиндрического реактора. Затем на оси цилиндра формируется фронт полного превращения, который распространяется по радиусу цилиндра к периферии, что обуславливает процесс вторичного структурообразования в условиях нестационарных полей температуры, поскольку происходит при остывании реагирующей шихты до температуры стенки реактора. При этом справа от фронта полного превращения формируется градиент глубины превращения (эта величина становится распределенной). Движение фронта полного превращения характеризуется отрицательным ускорением, которое тем

больше (по абсолютной величине), чем больше теплоотвод от поверхности цилиндрического реактора. Следовательно, остановка фронта полного превращения произойдет тем раньше (ближе к оси цилиндра), чем больше критерий Био. Это позволяет сделать вывод, что в зависимости от теплофизических условий проведения синтеза, определяемых условиями теплоотвода и температурой стенки, имеется три качественно различных механизма фазообразования: неполное превращение компонентов на оси цилиндра; фронт полного превращения останавливается, не доходя до внутренней поверхности цилиндрического реактора, при этом в объеме недореагировавшего продукта сохраняется градиент концентрации легкоплавкого компонента; фронт полного превращения доходит до внутренней поверхности реактора. Второй механизм определяет режим формирования функционально-градиентных материалов [3], последний — режим полного выгорания компонентов. При сравнительно малых значениях критерия Био в зависимости от температуры стенки реактора полное выгорание возможно на этапе первичного структурообразования, до момента достижения системой максимальных температур. Для значений теплового эффекта и энергии активации диффузии, определяющих данную бинарную систему, существует критическое значение критерия Био, зависящее от температуры окружающей среды, при котором полное выгорание компонентов в объеме еще возможно. Приведенные результаты позволяют констатировать, что при СВС в режиме теплового взрыва имеется возможность управления процессом фазообразования посредством целенаправленного изменения внешних теплофизических условий синтеза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: теория и практика. Черноголовка: Изд-во «Территория», 2001.
2. Мержанов А. Г., Барзыкин В. В., Абрамов В. Г. Теория теплового взрыва от Н. Н. Семенова до наших дней // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 6. С. 3–44.
3. Мержанов А. Г., Озерковская Н. И., Шкадинский К. Г. О протекании теплового взрыва в послейндукционный период // Докл. АН. 1998. Т. 362, № 1. С. 60–64.
4. Evstigneev V. V., Filimonov V. Y., Yakovlev V. I. The peculiarities of a structure

- formation process in a Ti—Al heterogeneous system at different thermal modes of synthesis // Intern. J. of SHS. 2004. V. 13, N 3. P. 209–219.
5. **Евстигнеев В. В., Филимонов В. Ю., Кошелев К. Б.** Математическая модель процессов фазообразования в бинарной порошковой смеси Ti—Al в режиме неадиабатического теплового взрыва // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 2. С. 52–57.
  6. **Мержанов А. Г., Озерковская Н. И., Шкадинский К. Г.** Динамика теплового взрыва в послеиндукционный период // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 65–70.
  7. **Некрасов Е. А., Смоляков В. К., Максимов Ю. М.** Адиабатический разогрев в системе титан — углерод // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 77–83.
  8. **Смоляков В. К., Некрасов Е. А., Максимов Ю. М.** Моделирование безгазового горения с фазовыми превращениями // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 2. С. 63–73.
  9. **Гонтковская В. Т., Городецков А. В., Перегудов А. Н., Барзыкин В. В.** Особенности теплового взрыва в системах с сильным самоторможением // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 77–79.
  10. **Алдушин А. П., Каспарян С. Г., Шкадинский К. Г.** Распространение фронта экзотермической реакции в конденсированных смесях, образующих двухфазные продукты // Горение и взрыв. М.: Наука, 1977.
  11. **Арутюнян А. Б., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И.** Роль стефановского потока в изменении объема конденсированной фазы в процессах реакционной диффузии // Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1975.
  12. **Некрасов Е. А.** К теории диффузионно-контролируемых процессов растворения твердых тел и роста слоя новой фазы в ограниченном объеме // Металлы. 1980. № 6. С. 198–203.
  13. **Некрасов Е. А., Максимов Ю. М., Алдушин А. П.** Расчет критических условий теплового взрыва систем гафний — бор и тантал — углерод // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 3. С. 113–120.
  14. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1977.

*Поступила в редакцию 28/VI 2007 г.,  
в окончательном варианте — 21/XII 2007 г.*

---