

Regimes of Connecting Materials with the Help of Synthesis in the Solid Phase

A. A. CHASHCHINA and A. G. KNYAZEVA

УДК 536.7+531+541+539

Режимы соединения материалов с использованием синтеза в твердой фазе

А. А. ЧАЩИНА, А. Г. КНЯЗЕВА

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, проспект Академический, 2/1, Томск 634021 (Россия)

E-mail: anna@ms.tsc.ru

Аннотация

Предложены математические модели соединения материалов с использованием смеси экзотермического состава с инертным наполнителем в режиме теплового взрыва и в режиме горения. Первая задача формулируется как задача о тепловом воспламенении в толстостенном сосуде, вторая – как задача о распространении фронта экзотермической реакции в щели между двумя толстыми пластинами. В целом при добавлении инертного наполнителя в соединительную смесь увеличивается время воспламенения, уменьшаются температура и скорость реакции, что совпадает с известными экспериментальными данными. В некоторой области параметров модели при численном исследовании задачи о воспламенении обнаружены различные режимы превращения: тепловой взрыв и медленное превращение в условиях слабо меняющейся температуры. При исследовании задачи о распространении реакции в щели также обнаружены различные режимы превращения при вариации теплофизических свойств веществ. Найдена область параметров, в которой реализуется самоподдерживающийся режим превращения. Для реальных технологий представляют интерес низкотемпературные режимы синтеза, так как в этом случае уменьшаются термические напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Соединение материалов с использованием синтеза в твердой фазе давно привлекает внимание исследователей и технологов. Примером может быть термитная сварка металлических материалов (рельсов, труб и т. п.), когда соединяемые материалы предварительно прогреваются до некоторой температуры $T_s \gg T_0$, где T_0 – температура реагента. Оценить условия воспламенения соединительного состава в этом случае можно на основе тепловой теории зажигания [1]. Полагая, что соединяемые материалы имеют достаточно большие размеры, приходим к задаче о зажигании слоя телом с большим запасом тепла [2]. Такую задачу можно рассматривать в сопряженной постановке, учитывая перераспределение температуры в системе за счет теплопроводности [3]. Соединение неметалли-

ческих материалов можно осуществить в режиме теплового взрыва или в режиме горения. Такая задача возникает, например, при сооружении электролизеров в алюминиевой промышленности. Формулировка задачи будет зависеть от условий эксперимента. В любом случае высокие температуры в зоне реакции часто нежелательны, так как сопровождаются большими термическими напряжениями, приводящими к растрескиванию соединяемых материалов. Во избежание этого следует использовать соединительные составы, содержащие реагенты, взаимодействующие с невысокими экзоэффектами. При этом требуется определить условия, необходимые для протекания реакции в конденсированной фазе, и их зависимость от свойств соединяемых материалов. Один из возможных способов уменьшения температуры превращения заключается в использовании в соединитель-

ном составе инертного наполнителя, который, с одной стороны, забирает часть тепла, уменьшая тепловыделение в реакции; с другой стороны, способствует поддержанию превращения за счет запасенного тепла. Возможное плавление инертного наполнителя также может способствовать достижению нужного результата. Если в начальный момент времени реагент и соединяемые материалы прогреты до одинаковой температуры ($T_0 \gg T_e$, где T_e – температура окружающей среды), то мы приходим к задаче о тепловом воспламенении в толстостенном сосуде. Влияние теплопотерь в окружающую среду может быть различным в зависимости от геометрии образцов.

Задача определения благоприятных условий соединения материалов с использованием экзотермического состава в режиме горения может быть сформулирована как задача о распространении пламени (фронта твердофазного превращения) в щели между двумя инертными материалами. В этом случае соединяемые материалы играют двойную роль: с одной стороны, они отводят тепло из зоны химических реакций, с другой – препятствуют деформации слоя реагента в поперечном направлении и способствуют прогреву реагента перед зоной реакции за счет теплопроводности.

Цель настоящей работы состоит в исследовании возможных режимов превращения при соединении инертных материалов.

ЗАДАЧА О ТЕПЛОМ ВЗРЫВЕ В ТОЛСТОСТЕННОМ СОСУДЕ

Рассмотрим задачу о тепловом взрыве в сосуде с толстыми стенками в следующей постановке. Пусть между двумя инертными пластинами толщиной h находится смесь вещества, способного к экзотермическому превращению, и инертного материала (рис. 1).

Обозначим толщину слоя, содержащего реагент, через $2r$, а долю инертного наполнителя через z . Начало координат поместим в центр узкого слоя. Задача симметричная, поэтому в центре $x = 0$ выполняется условие симметрии

$$\partial T / \partial x = 0 \quad (1)$$

Уравнение теплопроводности для смеси реагирующего вещества с инертным наполнителем с учетом тепловыделения в химической реакции имеет вид

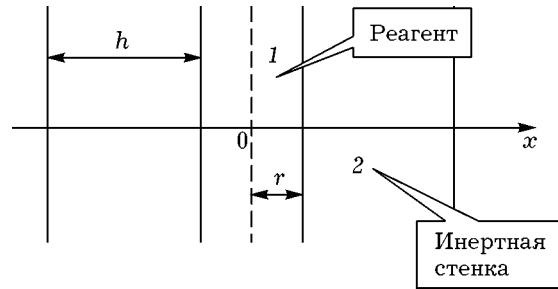


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи о тепловом воспламенении в толстостенном сосуде: 1 – реагент, 2 – соединяемые материалы. Обозн. см. в тексте.

$$\begin{aligned} |x| \leq r : [c_1 \rho_1 (1-z) + c_p z] \frac{\partial T}{\partial t} \\ = [\lambda_1 (1-z) + \lambda z] \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + (1-z) Q k_0 \phi_1 \phi_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности для инертных пластин не содержит источников и стоков тепла:

$$r + h \geq x \geq r : c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Полагаем, что реакция протекает по первому порядку, а скорость ее зависит от температуры по закону Аррениуса. Тогда для массовой доли продукта реакции a (или степени превращения) имеем

$$\frac{\partial a}{\partial t} = k_0 \phi_1(a) \phi_2(T) = k_0 (1-a) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

На границе между веществами считаем справедливыми условия идеального теплового контакта, что математически записывается следующим образом:

$$x = r : [\lambda_1 (1-z) + \lambda z] \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, T_1 = T_2 \quad (5)$$

На внешней границе инертного материала осуществляется теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона:

$$x = r + h : -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \alpha (T_2 - T_e) \quad (6)$$

В начальный момент времени заданы температура веществ T_0 и температура окружающей среды T_e :

$$T_1 = T_2 = T_0 \quad (7)$$

причем $T_0 \gg T_e$.

Требуется определить критические условия, разделяющие воспламенение и потухание, или различные режимы превращения в

зависимости от толщины и свойств инертного материала.

В (1)–(7) приняты следующие обозначения: c_i , ρ_i , λ_i – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности веществ соответственно (величины без индексов относятся к инертному наполнителю), T_i – их температура, x – пространственная координата, t – время, Q – тепловой эффект, E , k_0 – энергия активации и предэкспонент для суммарной реакции соответственно, α – коэффициент теплоотдачи.

В безразмерных переменных

$$\theta = \frac{T - T_0}{RT_0^2} E, \quad \xi = \frac{x}{r}, \quad \tau = \frac{t}{t_a}$$

где $t_a = \frac{c_1 \rho_1 RT_0^2}{EQk_0} \exp\left(\frac{E}{RT_0}\right)$ – период адиабатической индукции при температуре T_0 , задача (1)–(7) принимает вид

$$\xi \leq 1: \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = \delta^{-1} \frac{[(1-z) + B_\lambda z]}{[(1-z) + B_c z]} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + \frac{1}{[(1-z) + B_c z]} \exp\left(\frac{\theta_1}{1 + \beta \theta_1}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \gamma \exp\left(\frac{\theta_1}{1 + \beta \theta_1}\right) (1 - a) \quad (9)$$

$$1 \leq \xi \leq h: \quad K_c \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = K_\lambda \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \xi^2} \quad (10)$$

$$\xi = 0: \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} = 0 \quad (11)$$

$$\xi = 1: \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} = \frac{K_\lambda}{[(1-z) + B_\lambda z]} \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi}, \quad \theta_1 = \theta_2 \quad (12)$$

$$\xi = H + 1: \quad -K_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} = Nu(\theta_2 + \theta_e) \quad (13)$$

$$\tau = 0: \quad \theta_1 = 0, \quad \theta_2 = 0, \quad y = 0 \quad (14)$$

где $H = h/r$, $\sigma = r^2/(t_a \kappa_1)$, $Nu = \alpha r/\lambda_1$, $\beta = RT_0/E$, $K_c = c_2 \rho_2/(c_1 \rho_1)$, $K_\lambda = \lambda_2/\lambda_1$, $B_\lambda = \lambda/\lambda_1$, $B_c = cr/(c_1 \rho_1)$, $\theta_0 = (T_0 - T_e)/(RT_0^2)$, $\theta_0 = (T_0 - T_e)E/(RT_0^2)$, $\gamma = c_1 \rho_1 RT_0^2/(EQ)$, $\kappa_1 = \lambda_1/(c_1 \rho_1)$.

Задача (8)–(14) подробно исследована в [4, 5]. Здесь отметим следующее.

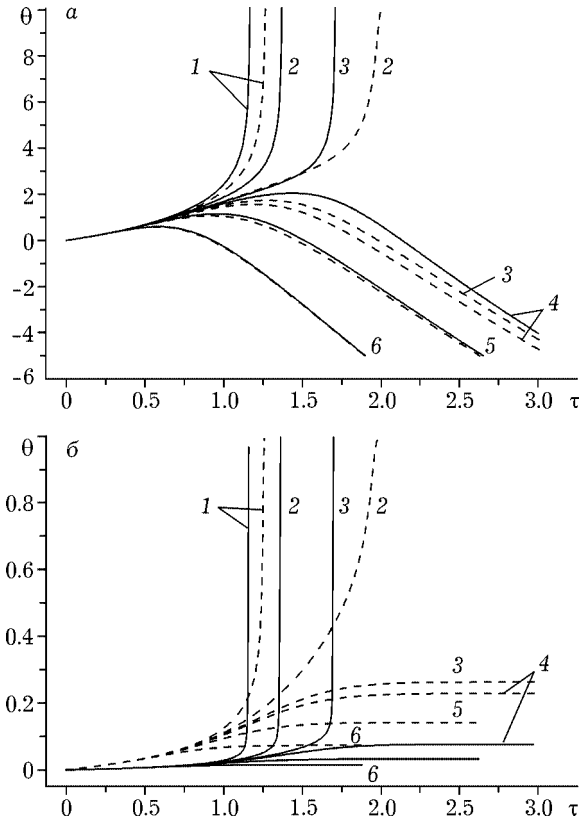


Рис. 2. Зависимость температуры (а) и степени превращения (б) от времени ($K_c = 5$, $K_\lambda = 10$, $Nu = 100$, $H = 2$, $\theta_0 = 20$): сплошные кривые – $\gamma = 0.01$ ($\delta^* = 4.6$), штриховые – $\gamma = 0.05$ ($\delta^* = 4.88$); значения δ : 5 (1), 4.9 (2), 4.88 (3), 4.6 (4), 4.5 (5), 4 (6).

В отличие от классической задачи о тепловом взрыве [6–8] в условиях сопряженного теплообмена возрастает роль выгорания даже при больших значениях θ_0 , что иллюстрирует рис. 2, а, б.

Как и в классической задаче о тепловом взрыве, при малых значениях δ и $\theta_0 = 20$ температура в центре реагента падает либо сразу, либо после небольшого повышения (сплошные кривые 4–6 и штриховые 5, 6 на рис. 2); а при значениях δ , больших, чем некоторое критическое значение δ^* , температура резко растет, т. е. происходит воспламенение (сплошные кривые 1, 2, штриховые 1–3 на рис. 2). Такой характер развития процесса типичен для нормального режима воспламенения. При воспламенении $a(0, \tau_B)$ приближается к единице даже в случае малых значений γ . Если $\gamma = 0.05$, существенные значения a наблюдаются и в случае падения температуры, т. е. в случае потухания. С ростом

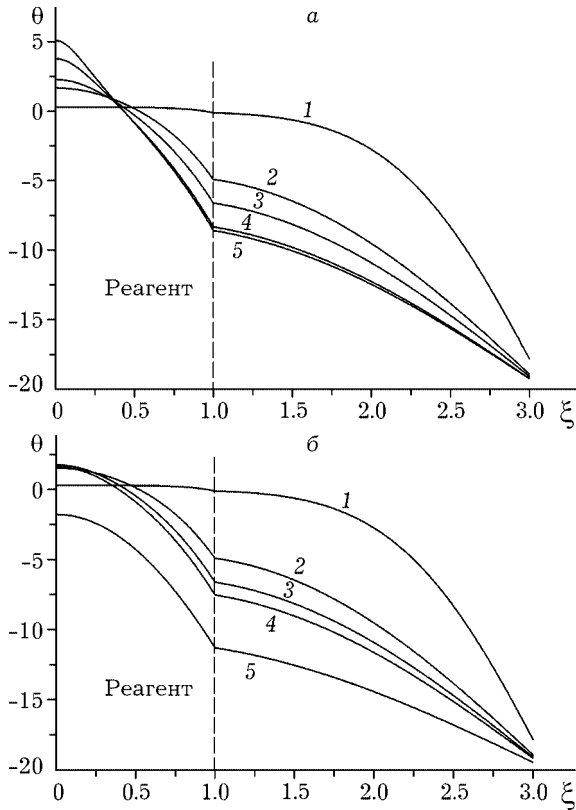


Рис. 3. Пространственное распределение температуры для $\delta = 4.6$ ($\theta_0 = 20$, $K_c = 5$, $K_\lambda = 10$, $Nu = 100$, $H = 2$): а - $\gamma = 0.01$ (воспламенение), значения τ : 0.25 (1), 1 (2), 1.28 (3), 1.62 (4), 1.68 (5); б - $\gamma = 0.05$ (потухание), значения τ : 0.25 (1), 1.01 (2), 1.45 (3), 1.62 (4), 2.4 (5).

γ растет и значение δ^* , что связано с уменьшением теплоприхода вследствие выгорания вещества. Увеличение роли выгорания объясняется особенностью задачи - дополнительным запасом тепла в стенках сосуда, способствующим превращению. Чем толще стенки сосуда, тем больше тепла запасается в них, тем менее существенна теплоотдача с торцов соединяемых материалов, тем меньше критическое значение δ^* . Влияние γ иллюстрирует рис. 3. Если при $\gamma = 0.01$ и $\delta = 4.6$ происходит воспламенение (см. рис. 3, а), то при $\gamma = 0.05$ и том же δ наблюдается потухание (см. рис. 3, б). Рис. 3, а соответствует сплошным кривым 4 на рис. 2, а рис. 3, б - штриховым кривым.

В ходе подробного численного исследования задачи обнаружено, что при добавлении инертного наполнителя в соединительный состав качественная картина процесса меняется. В некоторой области параметров задачи при варьировании параметра δ можно выделить

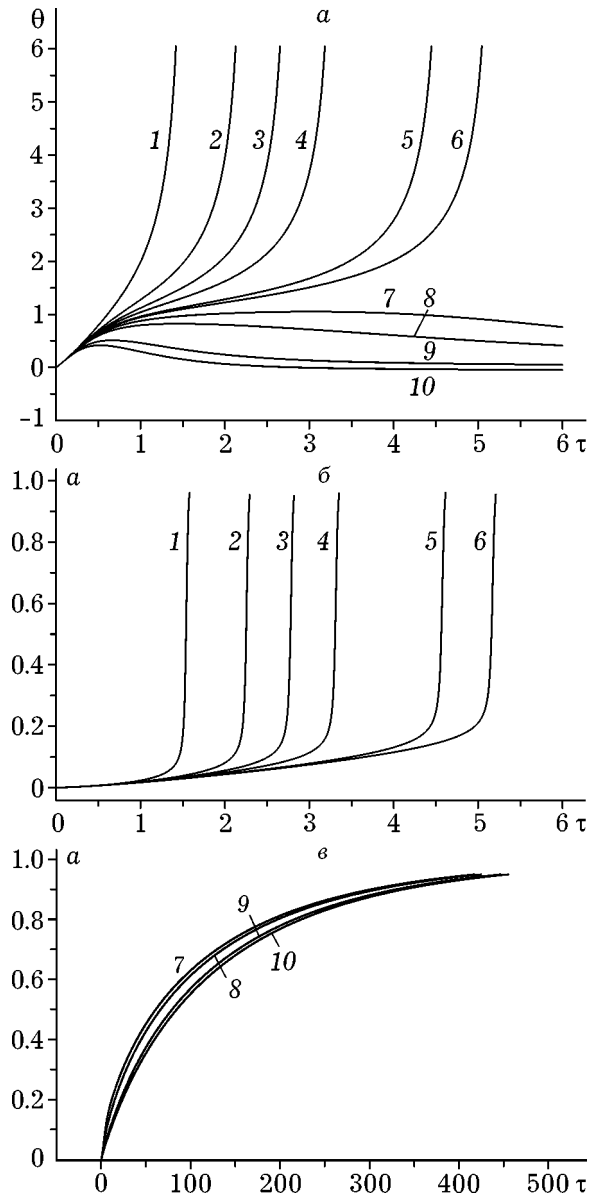


Рис. 4. Зависимость температуры (а) и степени превращения (б, в) от времени для быстрого (б) и медленного (в) режимов: сплошные кривые - $\theta_0 = 5$ ($\delta^* = 2.4$), штриховые - $\theta_0 = 20$ ($\delta^* = 3.07$); значения δ : 2 (1), 1.5 (2), 1.4 (3), 1.35 (4), 1.3 (5), 1.29 (6), 1.25 (7), 1.2 (8), 1 (9), 0.9 (10).

различные режимы превращения - "тепловой взрыв" и "медленное превращение". Во втором режиме превращение происходит при практически неизменной температуре реагента. Время полного превращения в различных режимах отличается на два порядка. В этом случае критическое значение δ при добавлении инертного материала в соединительную смесь приобретает иной смысл.

Зависимости температуры и степени превращения от времени для различных режи-

мов в центре реагента ($\xi = 0$) и набора параметров: $K_c = 5$, $K_\lambda = 10$, $H = 2$, $\theta_0 = 5$, $B_c = B_\lambda = 0.5$ – с учетом инертного наполнителя $z = 0.4$ представлены на рис. 4, а–в. В этом случае критическое значение $\delta^* = 1.28$ разделяет два различных режима – “тепловой взрыв” и “медленное превращение”. При воспламенении (см. рис. 4, а, б, кривые 1–6) полное превращение вещества происходит за малый период времени, следующий за индукционным периодом. Во втором режиме (кривые 7–10) идет постепенное накопление продукта реакции.

СОЕДИНЕНИЕ ДВУХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Рассматриваем задачу о соединении двух материалов с использованием синтеза в твердой фазе в режиме горения в следующей постановке. Допустим, что между двумя инертными пластинами толщиной H находится слой реагирующего вещества в смеси с инертным наполнителем толщиной h (рис. 5). Поджигание смеси осуществляем с левого торца, где в момент времени $t = 0$ температура повышается от T_0 до $T_s \gg T_0$. Требуется определить возможные режимы превращения в такой системе.

Задача является симметричной, поэтому для ее решения достаточно ограничиться верхней полуплоскостью. Математическая постановка включает уравнение теплопроводности в реагенте:

$$c_{\text{eff}} \rho_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + (1-a) Q k_0 \varphi_1(a) \varphi_2(T) \quad (15)$$

где $c_{\text{eff}} \rho_{\text{eff}} = c_1 \rho_1 (1-z) + c_2 \rho_2 z$, $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_1 (1-z) + \lambda_2 z$, и уравнение теплопроводности в инертных материалах:

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (16)$$

В общем случае теплофизические характеристики могут зависеть от температуры. Полагаем, что реакция протекает по первому порядку, а скорость ее зависит от температуры по закону Аррениуса аналогично (4).

Условия на внешних границах имеют вид

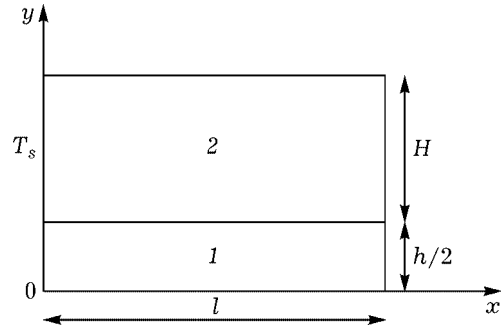


Рис. 5. Иллюстрация к постановке задачи о распространении превращения в щели между двумя инертными пластинами: 1 – реагент, 2 – соединяемые материалы. Обозн. см. в тексте.

$$x = 0 : \begin{cases} T_i = T_s, & t \leq t_1, \\ \frac{\partial T_i}{\partial x} = 0, & t > t_1 \end{cases} \quad (17)$$

$$x \rightarrow l : \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

На оси $y = 0$ выполняется условие симметрии:

$$y = 0 : \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

а на внешней границе соединяемых материалов осуществляется теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона:

$$y \rightarrow h/2 + H : -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha (T_e - T_2) \quad (20)$$

где t_1 – время действия импульсного источника.

На границе между веществами считаем справедливыми условия идеального теплового контакта, что аналогично (5):

$$y = h/2 : [\lambda_1 (1-z) + \lambda_2 z] \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad T_1 = T_2 \quad (21)$$

Требуется провести анализ возможных режимов превращения в такой системе.

В безразмерных переменных

$$\theta = (T - T_s) E / (R T_s^2), \quad \xi = x/x^*, \quad \eta = y/x^*, \quad \tau = t/t_a,$$

$$\text{где } t_a = \frac{\gamma}{k} \exp\left(\frac{E}{R T_s}\right), \quad x^* = \sqrt{\kappa_1 t_a}, \quad \kappa_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1},$$

задача (15)–(21) принимает вид

$$0 \leq \eta \leq \sqrt{\delta} : \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = F \left(\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \eta^2} \right) + G \varphi_1(a) \varphi_2(\theta)$$

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \gamma(1-a) \exp\left(\frac{\theta_1}{1+\beta\theta_1}\right)$$

$$\eta \geq \sqrt{\delta} : K_c \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = K_\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \eta^2} \right)$$

$$\xi = 0 : \theta_i = 0, \quad \tau \leq \tau_1 \text{ и } \frac{\partial \theta_i}{\partial \xi} = 0, \quad \tau > \tau_1$$

$$\xi = L : \frac{\partial \theta_i}{\partial \xi} = 0, \quad \eta = 0 : \frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} = 0$$

$$\eta = \sqrt{\delta} : \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial \eta} \right)_{\sqrt{\delta}-0} = K_\lambda \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} \right)_{\sqrt{\delta}+0}, \quad (\theta_1)_{\sqrt{\delta}-0} = (\theta_2)_{\sqrt{\delta}+0}$$

$$\eta = \Delta + \sqrt{\delta} : K_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial \eta} = Nu(\theta_2 + \theta_e)$$

$$\tau = 0 : \theta_1 = -\theta_s, \quad \theta_2 = -\theta_s$$

где $L = l/x^*$, $\Delta = H/x^*$, $\delta = h/x^*$,
 $Nu = \alpha\sqrt{\delta}/\lambda_1$, $\tau_1 = t_1/t_a$, $\beta = RT/E$,

$$\gamma = c_1 \rho_1 RT_s^2 / (QE), \quad \theta_0 = (T_s - T_0)E / (RT_s^2)$$

При численном исследовании задачи выявлены различные стационарные и нестационарные режимы превращения [9] (рис. 6).

1. Если теплопроводность и теплоемкость соединяемых материалов много меньше теплопроводности и теплоемкости реагента ($K_c \ll 1$, $K_\lambda \ll 1$), то через малый промежуток времени в системе устанавливается квазистационарный режим превращения (см. рис. 6, а).

Обнаружено, что в этом случае максимальное тепловыделение в реагенте происходит в зоне его контакта с соединяемыми материалами. Вследствие низкой теплопроводности соединяемых материа-

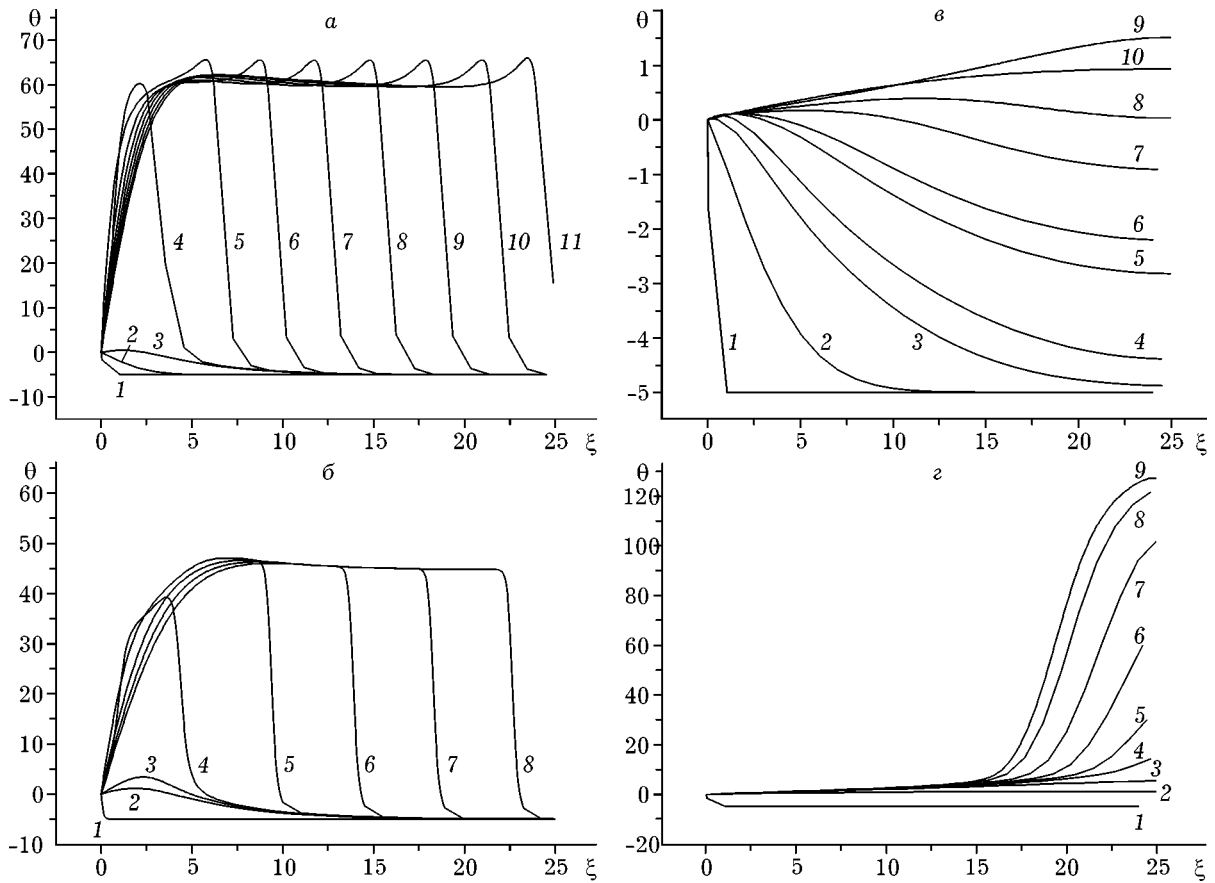


Рис. 6. Пространственное распределение температуры в различные моменты времени для разных режимов превращения: а - значения τ : 0.01 (1), 2 (2), 20.5 (3), 21.5 (4), 21.75 (5), 22 (6), 22.25 (7), 22.5 (8), 23 (9), 23.1 (10), 23.2 (11); $z = 0$, $\theta_0 = 5$, $K_\lambda = 0.1$, $K_c = 0.1$; б - значения τ : 0.01 (1), 31 (2), 33 (3), 34 (4), 35 (5), 37 (6), 38 (7), 39 (8); $K_c = 5$, $K_\lambda = 0.1$, $\theta_0 = 5$, $z = 0$, $\tau_c = 38.57$; в - значения τ : 0.01 (1), 5 (2), 25 (3), 45 (4), 100 (5), 125 (6), 175 (7), 200 (8), 225 (9), 299 (10); $K_c = 5$, $K_\lambda = 10$, $\theta_0 = 5$, $z = 0$, $\gamma = 0.01$; з - значения τ : 0.01 (1), 7.5 (2), 8.15 (3), 8.2 (4), 8.21 (5), 8.22 (6), 8.23 (7), 8.24 (8), 8.245 (9); $K_c = 0.1$, $K_\lambda = 10$, $\theta_0 = 5$, $z = 0$, $\gamma = 0.01$.

лов вдали от $\eta = \sqrt{\delta}$ инертное вещество практически не прогревается, но тем не менее тепла достаточно для поддержания стационарного режима превращения. Скорость стационарного режима мы можем приближенно оценить, используя результаты численных расчетов.

2. В случае большой теплоемкости ($K_c > 1$) и низкой теплопроводности ($K_\lambda \ll 1$) соединяемых материалов также существует стационарная стадия развития процесса, но фронт реакции распространяется с меньшей скоростью, чем в предыдущем случае (см. рис. 6, б), зона реакции более широкая. Вследствие увеличения запаса тепла и малой теплопроводности соединяемые материалы не успевают прогреться: фронт химической реакции опережает прогрев соединяемых материалов.

3. При увеличении теплопроводности соединяемых материалов стационарные режимы превращения могут и не наблюдаться. Например, если $K_\lambda = 10$, $K_c = 5$, происходит медленное превращение во всем объеме материала при низкой температуре: тепло, выделяющееся в зоне реакции, успевают отводиться в инертные стенки (см. рис. 6, в) вследствие их большой теплопроводности. Соединяемые материалыгреваются быстрее, тем самым способствуя прогреву реагента.

4. Для образца конечных размеров обнаружен режим превращения в форме теплового взрыва после длительного периода задержки. Такие режимы наблюдаются при очень низкой теплоемкости ($K_c \ll 1$), но высокой теплопроводности ($K_\lambda \gg 1$) соединяемых материалов (см. рис. 6, г).

На рис. 7 представлена зависимость времени полного превращения τ_c от параметров задачи, характеризующих теплофизические свойства. Время τ_c определялось по условию $a(L, 0) \geq 0.95$, что корректно для нормальных режимов горения.

Параметрический анализ показал, что при добавлении инертного наполнителя ($z \neq 0$) время τ_c увеличивается, скорость горения и температура продуктов горения уменьшаются, что соответствует представлениям, известным из анализа эксперимента.

Обнаруженные стационарные режимы превращения в такой системе аналогичны ста-

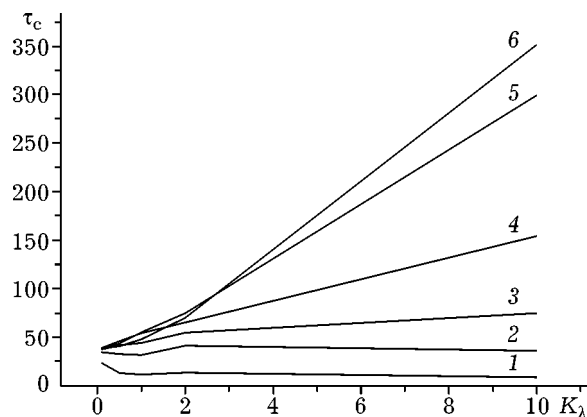


Рис. 7. Зависимость полного времени превращения от параметров задачи. $\theta_0 = 5$, $z = 0$, значения K_c : 0.1 (1), 0.5 (2), 1 (3), 2 (4), 5 (5), 10 (6).

циональным режимам, известным из теоретических представлений о горении слоевых систем [10, 11]. Для реальной технологии соединения материалов интерес представляют низкотемпературные режимы 2 и 3, которые, судя по результатам теоретического исследования, могут быть реализованы, если соединительный состав обладает нужными теплофизическими свойствами.

Численное исследование задачи с импульсным внешним источником показало [12], что в такой системе наблюдаются самоподдерживающиеся режимы превращения. Скорость распространения фронта зависит от соотношения теплофизических свойств разных материалов и от параметров, характеризующих реакцию. Обнаружено, что самоподдерживающиеся режимы реализуются в более широкой области параметров θ_0 , γ , β , чем это следует из классических представлений, и связано это с влиянием соединяемых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе описаны различные режимы превращения, которые можно наблюдать при соединении материалов с использованием синтеза в твердой фазе. Управление температурой синтеза возможно за счет подбора соединительного состава, доли и типа инертного наполнителя в нем. Дополнительная возможность снижения температуры синтеза появляется при

использовании инертного наполнителя с низкой температурой плавления. Очевидно, что при соединении различных материалов идет образование переходной диффузионной зоны и адсорбционных соединений, формирование пористой структуры соединительного шва, что не учтено в предложенных моделях, но представляет интерес для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 В. Н. Вилюнов, Теория зажигания конденсированных веществ, Наука, Новосибирск, 1984, 190 с.
- 2 В. Н. Вилюнов, А. К. Колчин, *ФГВ*, 4, 3 (1968) 101.
- 3 А. Г. Князева, Л. Н. Сливка, К вопросу о зажигании конденсированного вещества через преграду горячим телом, Деп. в ВИНТИ, № 6445–889, Томск, 1989, 23 с.
- 4 А. Г. Князева, А. А. Чащина, Численное исследование задачи о тепловом воспламенении в сопряженной постановке, В сб.: *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики*, Изд-во ТГУ, Томск, 2002, с. 118–119.
- 5 А. Г. Князева, А. А. Чащина, *ФГВ*, 4 (2004) 15.
- 6 Д. А. Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике, Наука, Москва, 1987, 490 с.
- 7 Я. Б. Зельдович, Т. Б. Баренблатт, Г. М. Махвиладзе, В. Н. Либрович, Математическая теория горения и взрыва, Наука, Москва, 1981.
- 8 Ю. М. Григорьев, А. Г. Мержанов, К. В. Прибыткова, *ПМТФ*, 5 (1966) 17.
- 9 А. А. Чащина, А. Г. Князева, Двумерная модель соединения материалов с использованием СВ-синтеза: Сб. статей IX Междунар. конф. "Физико-химические процессы в неорганических материалах", Изд-во КемГУ, Кемерово, 2004.
- 10 Т. П. Ивлева, П. М. Кришеник, К. Г. Шкадинский, *Хим. физика*, 2, 9 (1983) 1259.
- 11 К. Г. Шкадинский, П. М. Кришеник, *ФГВ*, 21, 2 (1985) 52.
- 12 А. А. Чащина, А. Г. Князева, *Физ. мезомеханика*, 7 (2004) 82.