

УДК 536.46

К ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА В СЛОЕВЫХ СИСТЕМАХ

В. Г. Прокофьев¹, В. К. Смоляков²

¹Томский государственный университет, 634050 Томск, pvg@ftf.tsu.ru

²Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, 634021 Томск

Рассматривается образование композиционного материала при безгазовом горении слоевого пакета. Горение внешних донорных слоев вызывает плавление внутреннего инертного слоя с последующим затеканием расплава в поры каркаса. Глубина затекания, определяющая структуру композиционного материала, зависит от размера пор, поверхностного натяжения, параметров фазового перехода и изменения поля температур.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, плавление, кристаллизация, фронт горения, пористая среда, капиллярное растекание.

Одно из перспективных направлений использования самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) — получение слоевых композиций. Для этого следует сформировать исходную слоевую структуру из смесей различной реакционной способности и инициировать горение в них параллельно плоскости сопряжения [1–4]. Такой прием — «химическая печка» — используется для синтеза в слабозкотермичных системах, когда под действием тепла, передаваемого от горящего слоя, имеющего высокую температуру (донорного слоя), происходит синтез в негорящем (акцепторном) слое. В качестве акцепторного слоя может использоваться не реагирующее легкоплавкое вещество, которое после плавления затекает в поры донорного слоя. В результате образуется композиционный материал, толщина слоя которого зависит от длины проникновения расплава в донорный слой. Вариантами такого процесса являются СВС-сварка в случае, когда акцепторный слой расположен между донорными слоями, СВС-пропитка и СВС-наплавка в случае двух разных слоев. В настоящей работе моделируется горение слоевых композиций, акцепторный слой которых — легкоплавкий металл, а донорный слой — высокоэкотермичная безгазовая смесь, образующая при горении пористый продукт.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается система, состоящая из двух плоских слоев реагирующей смеси одного и того же размера и внутреннего слоя из инертного легкоплавкого металла. В экспериментальной практике это могут быть смеси $Ti + B$, $Ti + C$ и им подобные, а также медь. В силу симметрии слоевой композиции достаточно рассмотреть горение двух слоев длиной L_0 : верхний слой толщиной $Y_0 - y_0$ представляет собой пористую безгазовую смесь, способную к горению, нижний слой исходной толщины $2y_0$ — легкоплавкое инертное вещество (рис. 1, а).

Для описания горения в донорном слое примем следующие допущения:

1) пористая среда представлена совокупностью капилляров, объем которых равен объему пор;

2) горение в слое не сопровождается структурными изменениями, т. е. пористость m_0 без учета заполнения пор расплавом, толщина слоя $Y_0 - y_0$ и длина L_0 остаются постоянными; это условие выполняется при равных плотностях смеси и продукта: $\rho_m = \rho_{pr} = \rho$;

3) горение донорного слоя проходит без фазовых переходов;

4) действие силы тяжести на растекание расплава пренебрежимо мало;

5) заполнение пор расплавом сопровождается образованием газовой области во внутреннем слое, объем которой равен объему жидкости, заполнившей поры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-03-00136-а).

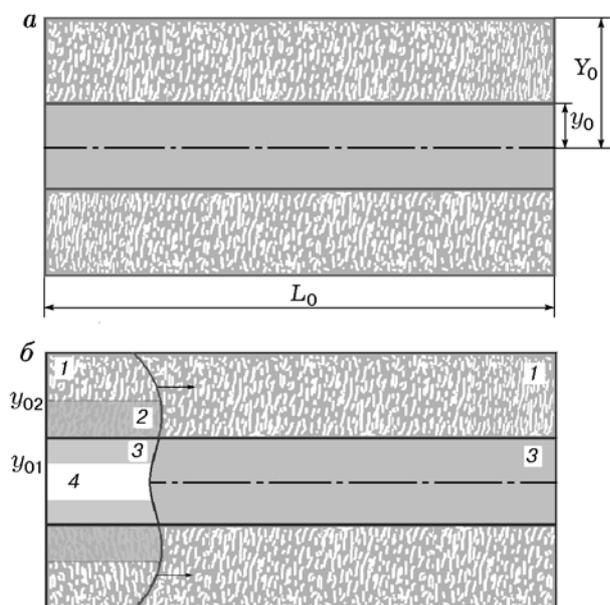


Рис. 1. Схема слоевого пакета (а) и образования характерных областей в процессе горения (б):

1 — пористая среда, 2 — продукты горения, пропитанные расплавом, 3 — металл в жидком или твердом состоянии, 4 — воздушная прослойка

В процессе горения слоевой системы (рис. 1,а) образуется несколько областей (рис. 1,б). В области 1, $y_{02} < y < Y_0$, находятся исходная безгазовая смесь и продукты горения смеси, в области 2, $y_0 < y < y_{02}$, — безгазовый состав и затекший в его поры расплав, в области 3, $y_{01} < y < y_0$, — расплав или твердый металл, в области 4, $0 < y < y_{01}$, — газ, замещающий расплав металла. В случае больших толщин инертного слоя или сильной теплоотдачи с его внешней поверхности возможно только частичное плавление. Тогда между расплавленным и твердым металлом образуется газовая прослойка.

Таким образом, задача расчета распространения фронтов горения, плавления, пропитки и кристаллизации сводится к решению уравнений теплопроводности и химического превращения в различных областях с подвижными границами.

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} [\Sigma(a_i H_i)] = \text{div} q. \quad (1)$$

Здесь a_i — содержание вещества в единице объема (массовая концентрация); $H_i = H_i(T_0) +$

$\int_{T_0}^T c_i(T) dT$ — энтальпия вещества при температуре T ; $H_i(T_0)$ — энтальпия вещества при стандартной температуре T_0 ; $c_i(T)$ — теплоемкость вещества; $q = -\lambda \text{grad} T$ — тепловой поток в выделенный объем, где λ — коэффициент теплопроводности, представляемый в виде

$$\lambda = \lambda_0 (1 - m)^z,$$

λ_0 — теплопроводность сплошной среды, z — показатель степени, m — пористость.

Для рассматриваемой стехиометрической смеси изменение массовых концентраций веществ (смеси и продукта) определяется соотношениями

$$a_m = (1 - m_0) \rho (1 - \alpha), \quad a_{pr} = (1 - m_0) \rho \alpha. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и пренебрегая различием теплоемкостей смеси и продукта (это позволяет не учитывать зависимость теплового эффекта от температуры), получаем уравнение теплопроводности в области $y_0 < y < Y_0$:

$$(1 - m) \rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = Q(1 - m) \rho_1 \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \text{div}(\lambda_1 \text{grad} T). \quad (3)$$

В области $y_0 < y < y_{02}$ будем пренебрегать растеканием расплава в направлении распространения фронта горения (вдоль оси x), вызванным термокапиллярным давлением. В этом случае течение расплава осуществляется только перпендикулярно плоскости слоев (в направлении оси y). Поэтому скорость капиллярного растекания имеет лишь одну компоненту $v_y = v_c$. В пренебрежении нестационарностью капиллярного впитывания расплава на начальном участке (для типичных размеров частиц, образующих капилляры в безгазовых смесях, его длина сопоставима с диаметром капилляра [5]) скорость пропитки пористой среды расплавом записывается в виде

$$v_c = k(m_0) \frac{dl}{dt} = \frac{k(m_0) r_c \sigma}{4\mu l}, \quad (4)$$

где $k(m_0)$ — удельная площадь пор или коэффициент фильтрации; l — глубина проникновения расплава; σ, μ — поверхностное натяжение и вязкость расплава; r_c — радиус капилляра. Для зернистых сред диаметр капилляра можно

принять примерно равным размеру мелких частиц: $2r_c \approx d$. Зависимость коэффициента k от пористости в (4) соответствует формуле Козени — Кармана $k(m_0) = m_0^3 / (1 - m_0)^2$. Координаты поверхностей раздела y_{02} и y_{01} определяются уравнениями

$$y_{02}(x, y, t) = y_0 + v_c(x, y, t)t, \quad (5)$$

$$y_{01}(x, y, t) = m_0 \int_0^{x_l} v_c(x, y, t) dx / x_l,$$

где x_l — координата фронта плавления на границе раздела слоев $y = y_0$; $v_c(x, y, t)$ — функция, задающая условия капиллярного растекания.

Течение инертного вещества происходит, когда его температура равна или превышает температуру плавления. Кроме того, затекание расплава возможно только при его наличии и существовании свободной пористости. Эти условия выразим с помощью символической функции Хэвисайда:

$$e(x - x_0) = \begin{cases} 1, & x > x_0, \\ 0, & x < x_0. \end{cases}$$

С учетом определения единичных функций капиллярное течение описывается функцией

$$v_c(x, y, t) = v_c e(T - T_l) e(y - y_0) \times \\ \times e(y_{02}(x, y, t) - y) e(y_0 - y_{01}(x, y, t)). \quad (6)$$

В соотношении (6) единичные функции выражают соответственно следующие необходимые условия существования капиллярного течения: температура выше температуры плавления, наличие свободной пористой среды (внешние слои), наличие расплава на границе между слоями.

Отметим одно важное обстоятельство. В общем случае затекание в безгазовую смесь расплава сопровождается конвективным теплопереносом, так как температура расплава отличается от температуры в реагирующем слое. Сравним скорость теплообмена втекающей жидкости, имеющей температуру T_l , с безгазовой смесью, имеющей температуру T_m , со скоростью конвективного притока тепла. Первую величину можно представить в виде $W_1 = \chi(T_m - T_l)$ — скорость теплообмена между фазами, вторую — в виде $W_2 = v_c c_l \rho_l m_0 T_l$ —

скорость конвективного переноса тепла. Здесь χ — коэффициент теплообмена, c_l , ρ_l — теплоемкость и плотность легкоплавкого вещества. Если $W_1 \gg W_2$, то скорость теплообмена существенно выше скорости конвективного потока тепла, нарушающего тепловое равновесие. В этом случае в области $y_0 < y < y_{02}$ можно пренебречь различием температур безгазовой смеси и расплава и считать температуры одинаковыми. Скорость теплообмена представим в виде

$$W_1 = \chi(T_m - T_l) = \frac{\lambda_1 \text{Nu}}{d}(T_m - T_l), \quad (7)$$

где Nu — число Нуссельта. Скорость втекания расплава в капилляр запишем с учетом (4):

$$W_2 = c_l \rho_l m_0 T_l \frac{k(m_0) r_c \sigma}{4\mu l}. \quad (8)$$

Из (7), (8) следует неравенство, определяющее применимость однотемпературного приближения:

$$\frac{r_c^2}{l} < \frac{2\mu \lambda \text{Nu}}{c_l \rho_l k(m_0)} \frac{T_m - T_l}{T_l}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) типичные значения определяющих параметров $\lambda_1 / c_l \rho_l \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, $\text{Nu} \approx 2$, $\sigma \approx 1 \text{ Н/м}$, $(T_m - T_l) / T_l \approx 1$, $k(m_0) \approx 1$, получаем оценку $r_c^2 / l < 10^{-7} \text{ м}$, из которой следует, что для тонких и достаточно длинных капилляров различием температур безгазовой смеси и втекающего расплава можно пренебречь. Для упомянутых высокоэкзотермичных систем Ti + B, Ti + C, в которых размер частиц металла обычно не превышает 10^{-6} м , оценка глубины проникновения расплава составляет $l > 10^{-5} \text{ м}$. При этом значении справедливо однотемпературное приближение.

Теплоемкость легкоплавкого вещества представим в виде

$$c_l = c_l^0 + Q_l \delta(T - T_l), \quad (10)$$

где c_l^0 — теплоемкость без учета фазового перехода, Q_l — теплота плавления;

$$\delta(T - T_l) = \begin{cases} \infty, & T = T_l, \\ 0, & T \neq T_l, \end{cases} \quad (11)$$

— символическая функция Дирака.

Массовые концентрации веществ в рассматриваемой области

$$\begin{aligned} a_m &= (1 - m_0)\rho(1 - \alpha), \\ a_{pr} &= (1 - m_0)\rho\alpha, \quad a_l = m_0\rho l. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя определения энтальпий веществ, выражения для массовых концентраций (12) и теплоемкости (10) легкоплавкого вещества в левую часть (1), приходим к уравнению теплопроводности в области $y_0 < y < y_{02}$:

$$\begin{aligned} &[(1 - m_0)\rho_1 c_1 + m_0\rho_l c_l + m_0\rho_l Q_l \delta(T - T_l)] \times \\ &\times \frac{\partial T}{\partial t} = Q(1 - m_0)\rho_1 \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \text{div}(\lambda_1 \text{grad} T). \end{aligned} \quad (13)$$

В области $y_{01} < y < y_0$ уравнение теплопроводности описывает распределение температуры в инертном плавящемся веществе:

$$\rho_l [c_l + Q_l \delta(T - T_l)] \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_l \text{grad} T). \quad (14)$$

В области $y < y_{01}(t)$ уравнение теплопроводности для газа имеет вид

$$\rho_g c_g \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_g \text{grad} T), \quad (15)$$

где ρ_g , c_g , λ_g — плотность, теплоемкость и теплопроводность газа.

Эффективную скорость одностадийной химической реакции представим в виде

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha), \quad (16)$$

где k_0 , E , R , $f(\alpha)$ — предэкспонент, энергия активации, газовая постоянная и кинетический закон реакции. В расчетах принималось $f(\alpha) = 1 - \alpha$.

Начальные условия:

$$t = 0: \quad T(x, y, 0) = T_0; \quad \alpha(x, y, 0) = 0. \quad (17)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x = 0: \quad &T = T_w(t < t_w), \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (t \geq t_w); \\ x = L: \quad &\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \\ y = Y: \quad &\frac{\partial T}{\partial y} = \chi_0(T_0 - T); \\ y = 0: \quad &\frac{\partial T}{\partial y} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

МЕТОД РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью сокращения числа параметров, для удобства вычислений и анализа результатов задача решалась в следующих безразмерных величинах:

$$\gamma = \frac{c_1 R T_*^2}{QE}; \quad \text{Ar} = \frac{RT_*}{E}; \quad \theta_i = \frac{(T_i - T_*)E}{RT_*^2};$$

$$\theta_0 = \frac{(T_0 - T_*)E}{RT_*^2}; \quad \theta_w = \frac{(T_w - T_*)E}{RT_*^2};$$

$$\theta_l = \frac{(T_l - T_*)E}{RT_*^2}; \quad A_{cap} = \frac{c_1 \rho_1 r c \sigma}{4\mu \lambda_1}; \quad \alpha_t = \frac{\chi_0 x_*}{\lambda};$$

$$t_* = \frac{c_1 R T_*^2}{QE k_0} \exp \frac{E}{RT_*}; \quad \tau = \frac{t}{t_*}; \quad \tau_w = \frac{t_w}{t_*};$$

$$x_* = \sqrt{\frac{\lambda_1 t_*}{c_1 \rho_1}}; \quad z = \frac{x}{x_*}; \quad \xi = \frac{y}{x_*}; \quad Y = \frac{Y_0}{x_*};$$

$$\xi_0 = \frac{y_0}{x_*}; \quad L = \frac{L_0}{x_*}; \quad \text{Ph} = \frac{Q_l}{Q}; \quad \Lambda_l = \frac{\lambda_l}{\lambda_1};$$

$$\Lambda_g = \frac{\lambda_g}{\lambda_1}; \quad C_l = \frac{c_l \rho_l}{c_1 \rho_1}; \quad C_g = \frac{c_g \rho_g}{c_1 \rho_1}.$$

Здесь индекс 1 относится к безгазовой смеси, g — к газу, l — к расплаву, $*$ — к масштабным параметрам, w — к источнику зажигания; Q , E — тепловой эффект реакции и энергия активации соответственно. Масштабная температура равна $T_* = T + Q/c_1$. Кроме известных в структурной макрокинетике безразмерных параметров, задача содержит новый — A_{cap} , представляющий собой отношение характерного времени капиллярного течения к времени теплопереноса. Величина A_{cap} может изменяться в широких пределах. В предельном случае $A_{cap} = 0$ затекания расплава в поры нет. Если $A_{cap} = \infty$, скорость пропитки пористого донорного слоя расплавом ограничена только скоростями плавления и кристаллизации инертного легкоплавкого слоя.

Численное решение системы уравнений (3), (13)–(18), приведенной к безразмерному виду, получено методом покоординатного расщепления с использованием неявной схемы. Граница инертной и реагирующей сред располагалась между узлами расчетной сетки. Для аппроксимации тепловых потоков использовались центральные разности. Обоснование

данной разностной схемы сквозного счета для решения многомерного квазилинейного уравнения теплопроводности с распределенными теплофизическими параметрами дано в работе [6]. Аппроксимационная сходимость проверялась сгущением узлов расчетной сетки. Консервативность разностной схемы проверялась выполнением закона сохранения энергии во всей расчетной области. Погрешность выполнения баланса энергии не превышала 2.2 %. Проводился контроль объема жидкости, впитавшейся в пористый слой, и объема газа, заменившего жидкость во внутреннем слое композиции:

$$\int_0^t \int_0^{x_1(t)} \int_0^{y_0(t)} dx dy dt = m_0 \int_0^t \int_0^{x_1(t)} \int_{y_0}^{y_0(t)} dx dy dt. \quad (19)$$

Погрешность выполнения условия (19) не превышала 1.6 %. Линейные скорости фронта горения определялись численно по перемещению поверхности $\alpha = 0.5$ в сечении $\xi = \xi_0 + (Y - \xi_0)/2$, параллельном оси z . Выполнение условия тепловой устойчивости фронта $9.1\gamma - 2.5Ag > 1$ позволяло рассматривать стационарные (в адиабатических условиях) режимы горения внешнего слоя.

Распространение волны горения по реакционному пористому слою, находящемуся в контакте с инертным слоем, зависит от тепловых, химических и гидродинамических факторов. Действие первых определено интенсивностью теплообмена, температурой плавления инертного слоя, теплопроводностью и теплоемкостью слоев. К числу химических факторов следует отнести скорость, кинетику и тепловой эффект химической реакции. Гидродинамические факторы определяют скорость и глубину капиллярного впитывания расплава в пористый донорный слой. Действие тепловых и химических факторов на распространение волны горения в донорном слое и термообработку акцепторного слоя изучалось в [2, 4]. В настоящей работе основное внимание уделено действию гидродинамических факторов, выраженных параметрами m_0 и A_{cap} , на все этапы синтеза: зажигание и выход на стационарный режим горения, устойчивость фронта, закономерности и скорость горения, особенности формирования структуры композиционного материала. Значения остальных параметров были заданы из области их реальных величин.

Возможность инициирования волны горения зависит от времени действия источника зажигания и его мощности (в данном случае от температуры накаливаемой стенки T_w). Так, при начальной температуре $\theta_0 = -6$ и температуре накаливаемой поверхности $\theta_w = 0$ зажигание возможно при времени контакта с накаливаемой стенкой $\tau_w \geq 100$. При $(Y - \xi_0)/\xi_0 < 1$ устойчивый режим горения не реализуется. Зажигание слоевой композиции и выход на стационарный режим горения проходят тем быстрее, чем меньше скорость и глубина проникновения расплава в донорный слой, т. е. меньше значения параметров A_{cap} , m_0 , ξ_0 .

Зависимость скорости горения от пористости (рис. 2) определяет обратную связь между глубиной превращения и скоростью проникновения расплава в горящий слой. Рис. 2 отражает следующий физический факт: увеличение количества легкоплавкого инерта в зоне распространения фронта при больших значениях A_{cap} сопровождается большими затратами тепла на нагрев вещества и уменьшением скорости горения. С другой стороны, уменьшение скорости горения способствует еще большему пребыванию вещества в высокотемпературной области фронта и, соответственно, большей глубине пропитки и тем самым уменьшает ско-

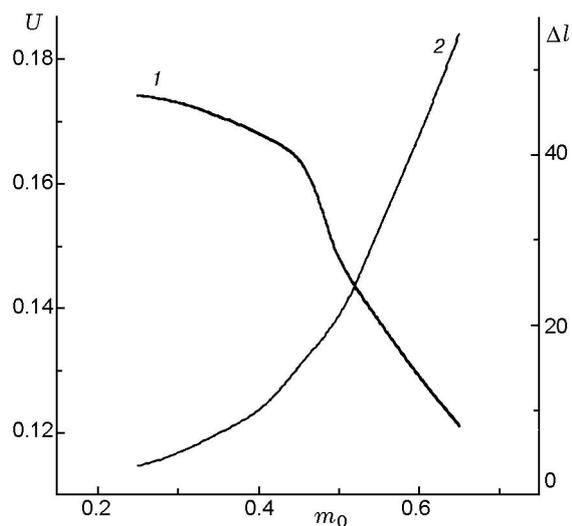


Рис. 2. Зависимости безразмерной скорости горения U (кривая 1) и безразмерной глубины пропитки Δl (кривая 2) от начальной пористости m_0 :

$\theta_0 = -6$, $\theta_i = -2.4$, $\theta_w = 0$, $\tau_w = 300$, $Ag = 0.1$, $Ph = 0.5$, $A_{cap} = 3$, $\alpha_t = 0.1$, $\Lambda_l = 3$, $\Lambda_g = 0.001$, $C_l = 1$, $C_g = 0.001$, $L = 400$, $Y = 100$, $\xi_0 = 30$

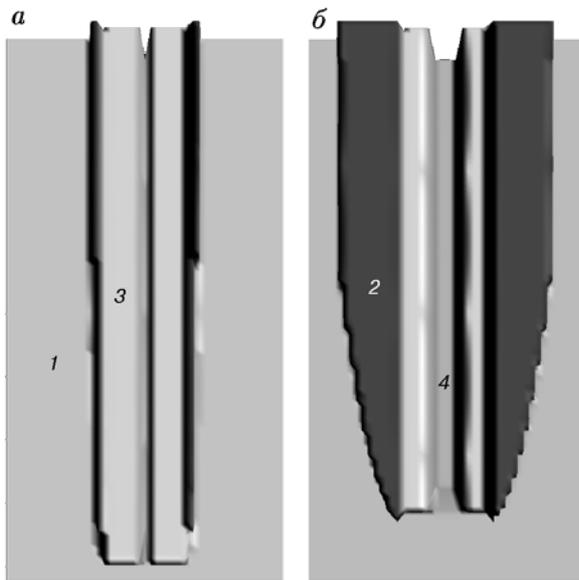


Рис. 3. Формирование слоевой структуры за фронтом горения. Стационарный режим:

области 1–4 соответствуют рис. 1; *a* — $m_0 = 0.35$, *b* — $m_0 = 0.6$

рость горения. Время сгорания образцов равной длины возрастает с увеличением A_{cap} , m_0 , ξ_0 .

Синтез композиционного материала определяется глубиной проникновения расплава в донорный слой. При малой пористости исходной шихты ($m_0 \leq 0.35$) и $A_{cap} < 1$ расплав практически не проникает в поры. Конечный продукт представляет собой слой пористого продукта горения безгазовой смеси и слой инертного металла, разделенные тонкой прослойкой композита (рис. 3, *a*). Такой процесс можно отнести к СВС-сварке металла с продуктом горения безгазового слоя.

В случае $m_0(Y_0 - y_0) = y_0$, $A_{cap} \gg 1$ и $\alpha_t = 0$ (адиабатические условия) металл полностью затекает в пористый слой, образуя композиционный материал. Этот процесс — СВС-пропитка.

Если $m_0(Y_0 - y_0) > y_0$ и $A_{cap} \gg 1$, то образуется двухслойный материал, состоящий из слоя продукта горения и слоя композита. При $m_0(Y_0 - y_0) < y_0$, $A_{cap} \gg 1$ образуется слой композиционного материала и остается слой металла. Оба эти случая можно отнести к СВС-наплавке.

В промежуточном варианте, когда $A_{cap} \approx 1$, возможно образование трехслойного материала: металл (в твердом или жидком состоя-

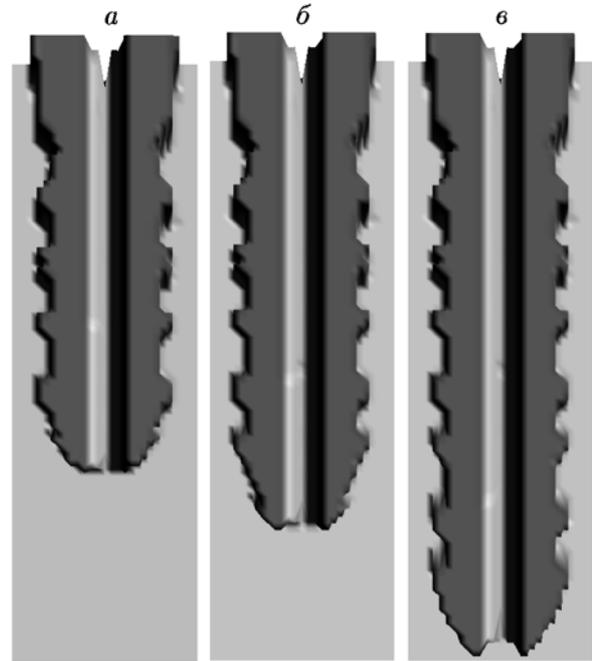


Рис. 4. Формирование композиционного материала в нестационарном режиме горения:

$\theta_0 = -6.4$, $\theta_l = -1$, $\theta_w = 0$, $\tau_w = 500$, $\text{Ar} = 0.11$, $\text{Ph} = 0.5$, $A_{cap} = 5$, $m_0 = 0.5$, $\alpha_t = 0.1$, $\Lambda_l = 2$, $\Lambda_g = 0.001$, $C_l = 1$, $C_g = 0.001$, $L = 650$, $Y = 100$, $\xi_0 = 20$; 1 — $\tau = 2850$, 2 — $\tau = 3250$, 3 — $\tau = 4050$

нии), продукты горения, пропитанные расплавом, пористые продукты горения безгазовой смеси (рис. 3, *b*).

В неустойчивых режимах горения глубина пропитки пористого слоя меняется в направлении оси z , коррелируя с возможными колебаниями скорости горения (рис. 4). Соответственно для получения однородного композиционного материала необходимо организовать синтез в стационарном режиме.

При высокой массовой скорости втекания расплава в зону химической реакции возможен эффект «заохлаживания» волны горения, проявляющийся в торможении скорости распространения фронта вплоть до срыва горения (рис. 5).

Таким образом, в результате организации горения в слоевом пакете можно реализовать различные технологические процессы: СВС-сварку, СВС-наплавку, СВС-пропитку. Практическим приемом регулирования структуры конечного продукта являются: варьирование толщин слоев, пористости, дисперсности (изменяющей эффективный диаметр капилляров

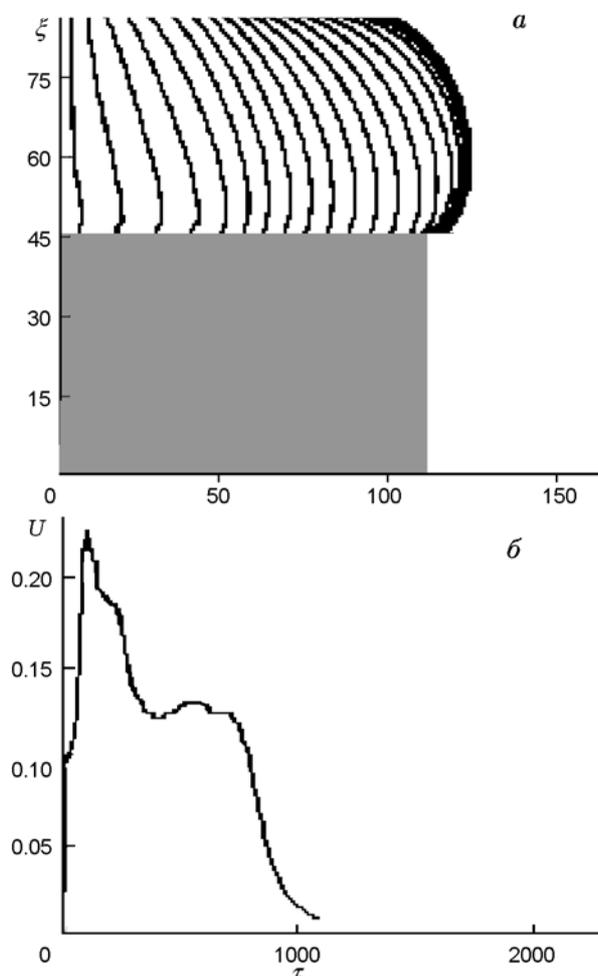


Рис. 5. Неустойчивый режим горения:

a — эволюция фронта горения, U — зависимость скорости горения от времени; $\theta_0 = -6.3$, $\theta_l = -2.4$, $\theta_w = 0$, $\tau_w = 200$, $Ag = 0.1$, $Ph = 0.5$, $A_{cap} = 3$, $m_0 = 0.6$, $\alpha_t = 0.1$, $\Lambda_l = 5$, $\Lambda_g = 0.001$, $C_l = 1$, $C_g = 0.001$, $L = 400$, $Y = 100$, $\xi_0 = 45$

и теплопроводность), соотношения реагентов; дополнительный подогрев слоевого пакета; замена металлической пластины слоем порошка для уменьшения теплопроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байдельдинова А. Н., Ксандопуло Г. И. Квазиadiaбатический самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов в композициях из сопряженных слоев // Неорган. материалы. — 2003. — Т. 39, № 10. — С. 1204–1207.
2. Писклов А. В., Прокофьев В. Г., Смоляков В. К. Безгазовое горение слоевого пакета в неadiaбатических условиях // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 2006. — № 5. — С. 102–108.
3. Чухломина Л. Н. Химически и термически сопряженный синтез композиций на основе нитрида кремния с использованием ферросилиция // Стекло и керамика. — 2009. — № 8. — С. 21–25.
4. Мержанов А. Г. Термически сопряженные процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. АН. — 2010. — Т. 434, № 4. — С. 489–492.
5. Хейфиц Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982.
6. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычислит. математики и мат. физики. — 1965. — Т. 5, № 5. — С. 816–827.

Поступила в редакцию 7/Х 2011 г.