

УДК 536.46  
DOI 10.17223/19988621/52/10

**В.Г. Прокофьев, О.В. Лапшин, В.К. Смоляков**

## **МАКРОКИНЕТИКА ГОРЕНИЯ СЛОЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ЛЕГКОПЛАВКИМ ИНЕРТНЫМ СЛОЕМ**

Рассматривается модель безгазового горения вертикального слоевого пакета, один из слоев которого состоит из инертного легкоплавкого металла, другие части пакета – высокоэкозотермичный безгазовый состав, в пористый продукт горения которого втекает расплавленный металл. Определены характерные режимы горения и синтеза композиционных материалов. Рассмотрена динамика формирования макроструктуры продуктов от стадии зажигания до выхода на устойчивый режим распространения фронта.

**Ключевые слова:** *самораспространяющийся высокотемпературный синтез, пористая среда, капиллярное течение, композиционный материал, моделирование.*

Горение гетерогенных систем – один из экономичных и эффективных способов получения композиционных материалов. Для получения композиционных материалов методом горения формируется образец из смеси реагирующих и инертных порошков. После синтеза продукт представляет собой материал из продуктов реакции, заключенных в матрицу инертного вещества. Ограничением этого способа является выполнение необходимых и достаточных условий самораспространяющегося режима синтеза [1].

Дополнительные возможности получения композиционных материалов дает специальное формование исходной структуры образца путем чередования слоев из реагирующей смеси порошков и инертных веществ. Инертные вещества могут быть в виде порошков или пластин из легкоплавких элементов или сплавов. После синтеза образуется слоистый композит. В зависимости от исходных толщин слоев и их пористости слои синтезированного продукта, пропитанные инертным веществом, могут этим веществом разделяться (избыток инерта). В противоположном случае (недостаток инерта) – слои композиционного материала разделены пористыми слоями синтезированного продукта, не содержащего легкоплавкого вещества. В частном случае при определенном соотношении исходных параметров (толщина слоев, пористость) композиционный материал будет макроскопически однородным, то есть не иметь слоистой структуры.

Экспериментальные исследования фронтального синтеза в слоистых системах проводились авторами [2–4]. Рассматривалось горение, как в направлении вдоль слоев (горизонтальный слоевой пакет), так и перпендикулярно к ним (вертикальный слоевой пакет). В [5] представлены результаты экспериментов по взаимодействию фольги из вольфрама с расплавом на основе Ni–Al в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). При соединении W-подложки с интерметаллидом NiAl в процессе СВС происходило образование сварного соединения толщиной 400 мкм. Математическое моделирование синтеза и формирование макроструктуры в направлении вдоль слоев (горизонтальный слоевой пакет) исследовалось в двухмерной постановке рассматривается в [6–10].

Следует отметить, что одномерный или двухмерный характер задачи определяется ориентацией слоев относительно направления распространения волны горения.

В настоящей работе анализируется горение в перпендикулярном направлении слоевой композиции из двух пористых реакционных слоев, разделенных слоем легкоплавкого инертного вещества, и формирование макроскопической структуры продукта. Этот частный случай горения многослойной системы можно рассматривать как горение вертикального по терминологии [2, 3] слоевого пакета. Отметим, что на практике такая трехслойная композиция может быть использована для сварки синтезируемых тугоплавких продуктов, в том числе разных по обе стороны слоя инертного вещества. Математическое моделирование безгазового горения вертикального многослойного пакета рассматривалось в [11, 12].

### Математическая модель

Сделаем следующие предположения:

1. Горючая смесь стехиометрическая. Реакция проходит с образованием одного продукта и описывается простой брутто-схемой. При горении смесь А образует тугоплавкий продукт F, пористость которого равна пористости исходной смеси.

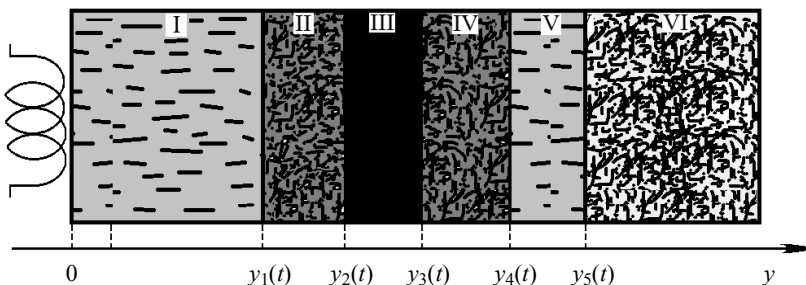
2. Плотности и теплоемкости смеси и продукта предполагаются равными. Равными также полагаются плотности и теплоемкости твердого инертного вещества и его расплава.

3. Капиллярное течение расплава в пористых каналах ограничено температурой каркаса, равной температуре плавления. При падении температуры расплава в зоне пропитки ниже температуры плавления жидкость кристаллизуется и течение в порах прекращается.

4. Втекающий в пористую реагирующую смесь расплав не влияет на кинетику синтеза продукта F.

Рассмотрим образец, образованный двумя слоями горючей смеси, между которыми находится слой легкоплавкого инертного вещества. На рис. 1. представлены области, которые возможны в ходе синтеза и формирования конечного продукта.

Уравнения теплопроводности в различных участках получим аналогично [13].



**Рис. 1.** Структура образца: I – продукты горения безгазовой смеси, II – композиционный материал, III – слой металла, IV – композиционный материал, V – продукты горения безгазовой смеси, VI – свежая безгазовая смесь

**Fig. 1.** Scheme of the sample: I, combustion products of gasless mixture; II, composite material; III, layer of metal; IV, composite material; V, combustion products of gasless mixture; and VI, fresh gasless mixture

Исходная толщина слоя инертного вещества –  $y_i(0) = y_3(0) - y_2$ , толщина слоя горючей смеси, расположенного слева от инертного слоя –  $y_2$ , границы правого слоя горючей смеси удовлетворяют неравенству  $y_3(t) < y < \infty$  – полуограниченный слой. Движение границы  $y_3(t)$  обусловлено втеканием расплава в пористые слои.

В области I ( $0 < y_1(t)$ ) перед слоем инертного вещества, где проходит синтез тугоплавкого продукта F, рассмотрим уравнение теплопроводности

$$(1-m)\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) + (1-m)Q\rho_2 \frac{d\alpha}{dt} - \chi_e(T_2 - T_0) \quad (1)$$

и уравнение химической кинетики

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T_2)f(\alpha). \quad (2)$$

В (1), (2) использованы обозначения:  $T_2$  – температура реагирующей смеси;  $T_0$  – начальная температура и температура окружающей среды;  $t$  – время;  $f(\alpha)$  – кинетический закон, который в расчетах принимался в виде  $f(\alpha) = 1 - \alpha$ ;  $\alpha$  – глубина превращения (массовая доля продукта в реагирующей смеси);  $k(T_2) = k_0 \exp(-E/RT_2)$ ,  $k_0$ ,  $E$  – константа скорости реакции, предэкспонент и энергия активации химической реакции;  $Q$  – тепловой эффект реакции;  $c_2$ ,  $\rho_2$ ,  $\lambda_2$  – теплоемкость, плотность и теплопроводность смеси;  $m$  – пористость;  $\chi_e$  – коэффициент внешнего теплообмена;  $R$  – газовая постоянная.

В области II ( $y_1(t) < y < y_2$ ) в общем случае находится реагирующая смесь и втекающий в нее расплав. Граница  $y_2$ , определяющая исходную длину участка пористого слоя до слоя металла, не меняется со временем. Уравнения теплового баланса в смеси и расплаве имеют вид

$$(1-m)c_2\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + (1-m)\rho_2 Q \frac{\partial \alpha}{\partial t} - \chi(T_2 - T_1) - \chi_e(T_2 - T_0); \quad (3)$$

$$m\rho_1[c_1 + Q_L\delta(T_1 - T_L)] \left[ \frac{\partial T_1}{\partial t} - V_- \frac{\partial T_1}{\partial y} \right] = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \chi(T_2 - T_1) - \chi_e(T_1 - T_0), \quad (4)$$

где  $T_1$  – температура инертного вещества;  $V_-$  – скорость течения расплава в области  $y_1(t) < y_2(t)$ ;  $\delta(T_1 - T_L)$  – дельта-функция Дирака;  $\rho_1, c_1, \lambda_1$  – плотность, теплоемкость и теплопроводность инерта;  $T_L, Q_L$  – температура и теплота плавления инерта. Величину скорости капиллярного течения определяет формула [14]

$$V = \frac{dl}{dt} = \frac{\sigma d_c}{8\mu l}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $d_c$  – диаметр капилляра;  $\mu$  – вязкость расплава;  $l$  – длина пути, пройденная жидкостью в капилляре, или глубина пропитки расплавом пористого каркаса. Интегрируя (5), получим

$$l^2 = \frac{\sigma d_c}{4\mu} (t - t_s), \quad (6)$$

где  $t_s$  – время начала затекания расплава в поры.

В общем случае, наряду с капиллярным течением, возможно термокапиллярное, вызванное градиентом температуры. Оценим его величину. Скорость термокапиллярного течения в неравномерно нагретых капиллярах [15]

$$V_{tc} \approx \frac{1}{2\mu} \frac{d\sigma}{dT_2} \frac{dT_2}{dy} d_c, \quad (7)$$

где  $\frac{dT_2}{dy}$  – градиент температуры в направлении  $y$ . Зависимость поверхностного натяжения от температуры удовлетворительно описывается формулой Этвеша, которая имеет вид [16]

$$\sigma = K(T_k - T_1) \left( \frac{\rho_1}{M} \right)^{2/3}, \quad (8)$$

где  $T_k$  – критическая температура, при которой  $\sigma = 0$  (температура кипения);  $M$  – молекулярная масса;  $K$  – константа, равная практически для всех систем  $2.1 \cdot 10^{-7}$  Дж/К. Как следует из (8), с ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается линейно.

В то же время вязкость уменьшается с температурой экспоненциально:

$$\mu = \mu_0 \exp(E_\mu / RT), \quad (9)$$

где  $\mu_0$  – предэкспонента;  $E_\mu$  – энергия активации вязкого течения.

Из анализа (7), принимая во внимание (8), (9), следует, что повышение или понижение температуры действует на скорость термокапиллярного течения разнонаправлено, то есть они частично компенсируют друг друга.

Определим вклад капиллярного и термокапиллярного течений в общую скорость движения жидкости в капилляре. Суммарная скорость течения

$$V_\Sigma = V + V_{tc}. \quad (10)$$

Подставляя в (10) (5), (7) и полагая  $\frac{d\sigma}{dT_2} \approx \frac{d\sigma}{dT_1}$ , имеем

$$V_\Sigma = \frac{d_c \sigma}{8\mu l} \left( 1 + \frac{4l}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT_1} \frac{dT_2}{dy} \right) = V \left( 1 + \frac{4l}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT_1} \frac{dT_2}{dy} \right). \quad (11)$$

Проведем оценки второго члена в круглых скобках формулы (11) для типичных значений величин. Поверхностное натяжение  $\sigma = 1$  Н/м; в соответствии с (8) величина  $|d\sigma/dT_1|$  для  $\rho_1 = 4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $M = 4 \cdot 10^{-2}$  кг примерно равна  $4.3 \cdot 10^{-4}$  Дж/(К·м<sup>2</sup>). Градиент температуры

$$\left| \frac{dT_2}{dy} \right| \approx \frac{\Delta T_2}{\Delta y} = \frac{2000 \text{ К}}{10^{-3} \text{ м}} = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{К}}{\text{м}}.$$

За длину капиллярного растекания  $l$  примем размер реакционной ячейки, примерно равный диаметру легкоплавкого реагента  $l \approx 10^{-4}$  м. Подставляя приведенные значения в (11), получим оценку второго члена 0.35. Таким образом, термокапиллярным растеканием можно пренебречь и в дальнейшем полагать  $V_\Sigma = V$ .

В области III ( $y_2 < y < y_3(t)$ ) может существовать расплав или твердый металл. Исходная толщина инертного слоя  $y_3(0) - y_2 = y_{i0}$  – один из основных параметров задачи. Закон движения границы  $y_3$  определяется суммарной скоростью течения расплава  $y_3(t) = (V_- + V_+)mt$ , где  $V_+$  – скорость течения жидкой фазы в порах правой части образца. Для этой области уравнение теплопроводности в силу допущения п. 2 имеет вид

$$\rho_1 [c_1 + Q_L \delta(T_1 - T_L)] \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} - \chi_e (T_1 - T_0). \quad (12)$$

В области IV ( $y_3(t) < y < y_4(t)$ ), где расплав растекается в направлении холодной границы в порах реагирующей смеси, уравнения теплопроводности для двухфазной среды имеют вид (3) и (4), а уравнение кинетики – (2). В уравнении теплопроводности для расплава (4) скорость  $V_-$  следует заменить на скорость течения в противоположном направлении  $-V_+$ . Отметим, что  $V_-$  и  $V_+$  несмотря на то, что определяются из уравнения (5), отличаются по абсолютной величине, так как время начала (окончания) течения  $t_s$  в поры левой и правой частей отличаются.

Наконец, в областях V и VI ( $y_4(t) < y < y_5(t)$ ,  $y_5(t) < y < \infty$ ,  $y_5(t)$  – координата фронта горения), где находятся продукты горения и свежая смесь, нет расплава, температура и глубина превращения определяются уравнениями вида (1) и (2).

Возможна ситуация, когда слои композитов II и IV не образуются, например при высокой температуре плавления или низкой калорийности смеси. И наоборот, полное плавление внутреннего слоя с последующим втеканием расплава в продукты горения безгазовой смеси может привести к исчезновению металлического слоя III и образованию единого композиционного слоя в результате объединения областей II и IV.

Предполагая скорости движения фронтов капиллярного течения  $y_1(t)$  и  $y_4(t)$  равными, можно оценить значение пористости, необходимое для получения однородного композита на участке образца длиной  $2\Delta y$ . Пористость смеси  $m$  и толщина инертного слоя  $y_{i0}$  должны удовлетворять баланскому соотношению  $m = y_{i0} / (2\Delta y)$ . В этом случае в процессе формирования композита существуют области I, II, III, IV, V. Тогда конечная пористость на рассматриваемом участке  $2\Delta y$  будет равна  $m_k = 0$ .

Если пористость смеси  $m > m^*$ , инерта недостаточно, чтобы заполнить все поры образца длиной  $2y_0$ . В конечном продукте существуют слои тугоплавкого продукта F, не содержащего инерта. При относительно большой толщине плавящегося слоя и условии  $m < m^*$  объем пор меньше объема инерта. Часть инерта в конечном продукте остается в виде слоя, разделяющего композиционный материал. Наконец, если инертное вещество не плавится, то композиционный материал не формируется, а горение слоистого образца описывается уравнениями (1), (2), (12). Такая задача рассмотрена в [17]. Влияние инертной преграды на распространение волны горения также рассматривалось в [18].

Обратим внимание на следующее обстоятельство. В области II, куда затекает расплав с температурой, меньшей (большей), чем температура пористой смеси, в уравнении (4) учитывается возможность кристаллизации. Так может происходить в неустойчивых (автоколебательных) режимах горения, когда в период депрессий температура может опускаться ниже температуры плавления. Если температура пористого каркаса  $T_2$  в зонах пропитки становится меньше температуры плавления  $T_L$ , течение расплава прекращается. Координаты движущихся границ раздела слоев и расчетных областей находятся в процессе вычисления с учетом условий затекания в поры расплава в соответствии с формулой (6).

На левой границе образца моделируется действие источника зажигания – накаливаемой стенки  $y = 0$ :  $T_2 = T_W$  ( $t < t_W$ ),  $\partial T_2 / \partial y = 0$  ( $t > t_W$ ). На подвижных границах  $y_1(t)$  и  $y_4(t)$  для температуры жидкой фазы задаются условия, отражающие межфазный теплообмен, соответственно  $\lambda_1 \partial T_1 / \partial y - \chi(T_1 - T_2) = 0$  и

$\lambda_1 \partial T_1 / \partial y - \chi(T_2 - T_1) = 0$ . На межслоевых границах  $y = y_2$  и  $y = y_3(t)$  до начала течения расплава в порах левой и правой частях образца задаются условия сопряжения:  $T_1 = T_2$ ,  $\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = (1-m)\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}$ .

Начальные условия  $-t = 0$ :  $T_1 = T_2 = T_0$ ,  $\alpha = 0$ .

Равновесная адиабатическая температура горения системы при равенстве объемов инертного и горючего материала слоевой композиции может быть рассчитана по формуле

$$T_* = T_0 + \frac{\rho_2 Q(1-m) - \rho_1 Q_L m}{\rho_2 c_2(1-m) + \rho_1 c_1 m} \quad (13)$$

### Результаты расчетов

Для удобства вычислений и анализа результатов математическая постановка приводилась к безразмерному виду с помощью следующих величин:

$$Td = \frac{cRT_*^2}{QE}, \quad \theta_1 = \frac{(T_1 - T_*)E}{RT_*^2}, \quad \theta_2 = \frac{(T_2 - T_*)E}{RT_*^2}, \quad \theta_L = \frac{(T_L - T_*)E}{RT_*^2}, \quad \theta_0 = -Td^{-1},$$

$$Ar = \frac{RT_*}{E}, \quad \xi = \frac{y}{y_*}, \quad y_* = \sqrt{\frac{\lambda_{20} t_*}{c\rho}}, \quad t_* = \frac{cRT_*^2}{QEK(T_*)}, \quad K(T_*) = k_0 \exp(-E/RT_*), \quad \tau = \frac{t}{t_*},$$

$$\tau_W = \frac{t_W}{t_*}, \quad \Lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_{20}}, \quad C = \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}, \quad A_{cap} = \frac{c_2 \rho_2 d_c \sigma}{4\mu\lambda_{20}}, \quad Ph = \frac{Q_L}{QTd}, \quad \lambda_2 = \lambda_{20}(1-m)^n,$$

$$\alpha_e = \frac{\chi_e y_*}{\lambda_{20}}, \quad \alpha_i = \frac{\chi y_*}{\lambda_{20}}, \quad L_{i0} = \frac{y_{i0}}{y_*}, \quad L_2 = \frac{y_2}{y_*}.$$

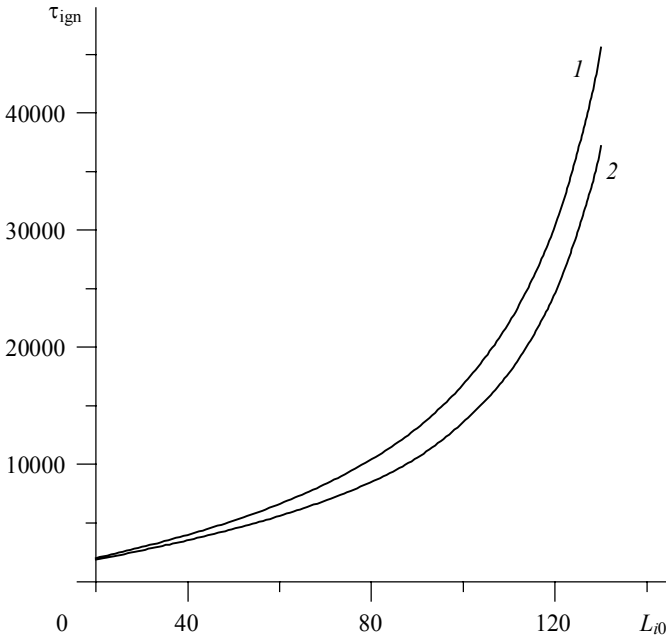
Параметр, определяющий скорость и глубину пропитки смежных пористых слоев расплавом,  $-A_{cap}$ , представляет собой отношение характерного времени капиллярного течения ко времени кондуктивного теплопереноса. В зависимости от характерного размера пор, теплофизических свойств пористой среды и вязкости жидкой фазы величина  $A_{cap}$  может изменяться в широких пределах. В предельном случае  $A_{cap} = 0$  расплав в поры не затекает. Ограничим параметрическое исследование задачи безразмерными величинами, которые определяют структуру получаемого композиционного материала:  $A_{cap}$ ,  $m$ ,  $L_i$ ,  $\Lambda$ ,  $\alpha_e$ . Значения других параметров принимали равными:  $Td = 0.16$ ;  $Ar = 0.12$ ;  $Ph = 0.5$ ;  $\theta_L = -2$ ;  $\alpha_i = 0.1$ ;  $L_2 = 100$ ;  $C = 1$ .

Численное решение системы уравнений (1), (3), (4), (12), приведенной к безразмерному виду, получено методом прогонки с использованием неявной схемы. Проводился контроль объема жидкой фазы, втекающей в поры

$$m \left( \int_0^t \int_{y_1(t)}^{y_2} dy + \int_0^t \int_{y_3(t)}^{y_4(t)} dy \right) = \int_0^t \int_{y_2}^{y_3(t)} dy. \quad (14)$$

Погрешность выполнения условия (14) не превышала 1%. Линейные скорости фронта горения в левой и правой частях слоевой композиции определялись численно по перемещению точки  $\alpha = 0.5$ .

В зависимости от параметров инертного слоя возможны два варианта горения образца, разделяемые критическими условиями. В первом образец реагирует полностью с определенным временем задержки на преодоление слоя и всплеском скорости горения в момент воспламенения правой части. Во втором волна горения не проходит через слой. В адиабатических условиях  $\chi_e = 0$  реализуется только первый вариант, т.е. волна горения вне зависимости от параметров преодолевает слой [18]. При учете теплоотдачи появляются критические условия, разделяющие варианты горения образца. Эти условия зависят от размера и физико-химических параметров инертного слоя: с увеличением толщины слоя и уменьшением его теплопроводящих свойств время зажигания правой части образца нелинейно растет (рис. 2). Для легкоплавкого инерта ( $\theta_L \ll 0$ ) увеличение числа фазового перехода  $Ph$ , характеризующего теплоту плавления, приводит к увеличению времени задержки, а вблизи критических условий – и к срыву горения. Уменьшение температуры плавления сужает зону прогрева в инертном слое, при этом уменьшаются потери тепла на преодоление волной горения преграды. Режим горения до и после инертного слоя определяется параметрами активной среды. Параметры инертного слоя определяют только время выхода волны на устойчивый режим с характеристиками горения, соответствующими активной среде. Чем больше время задержки фронта при преодолении инертного слоя, тем больше зона прогрева в активной части образца за ним. Влияние затекания расплава в поры на воспламенение и преодоление волной горения инертной преграды незначительно.

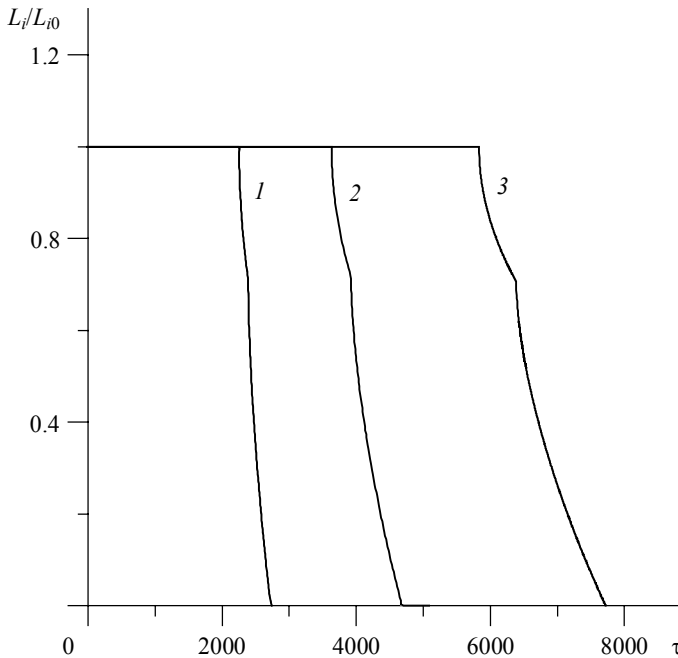


**Рис. 2.** Зависимость времени зажигания правой части образца ( $y > y_3(t)$ ) от толщины металлического слоя III: 1 –  $\Lambda = 3$ , 2 –  $\Lambda = 10$ ;  $m = 0.5$ ,  $A_{\text{cap}} = 1$ ,  $\alpha_e = 0$

**Fig. 2.** Ignition time of the right part of sample as a function of metal layer thickness III:  $\Lambda = (1) 3$ , (2) 10;  $m = 0.5$ ,  $A_{\text{cap}} = 1$ , and  $\alpha_e = 0$

Распространение волны горения в слоевой композиции зависит от тепловых, химических и гидродинамических факторов. Действие первых определено интенсивностью теплообмена, температурой плавления инертного слоя, теплопроводностью и теплоемкостью веществ композиции. В число химических факторов следует отнести скорость, кинетику и тепловой эффект химической реакции. Гидродинамические факторы определяют скорость и глубину капиллярного впитывания расплава в поры и зависят от структурных параметров  $m$  и  $A_{\text{cap}}$ . Эти факторы в первую очередь определяют особенности формирования структуры композиционного материала.

Динамика уменьшения толщины внутреннего слоя в адиабатическом режиме горения  $\chi_e = 0$  представлена на рис. 3. Первая точка излома кривых 1–3 соответствует началу проникновения расплава в правую часть образца. Следующая по времени точка излома кривых соответствует началу течения в левую часть. Такая очередность в пропитке обусловлена тем фактом, что капиллярное течение расплава становится возможным только после полного проплавления внутреннего слоя, которое происходит только после воспламенения правой пористой части образца. С увеличением толщины внутреннего слоя процесс пропитки замедляется, но при отсутствии внешнего теплоотвода расплав внутреннего слоя полностью затекает в поры с образованием композиционного материала.

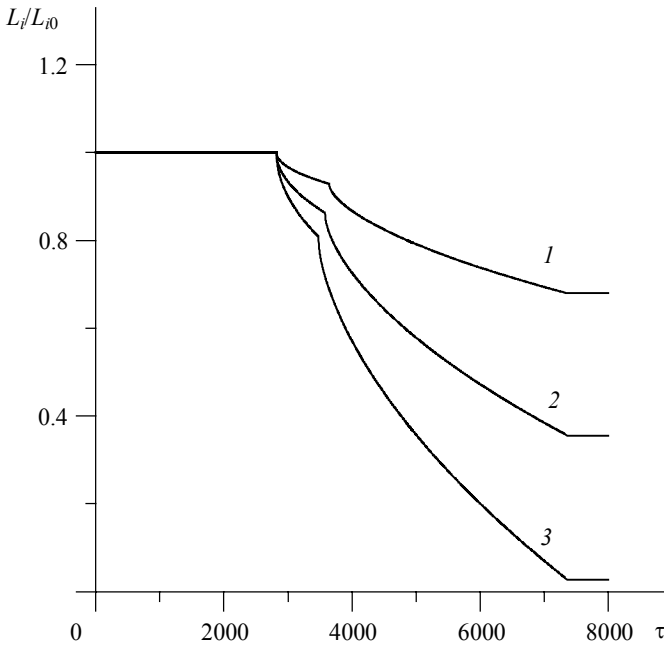


**Рис. 3.** Изменение относительной толщины внутреннего слоя в адиабатическом режиме горения: 1 –  $L_{i0} = 20$ , 2 –  $L_{i0} = 30$ , 3 –  $L_{i0} = 40$ ;  $\Lambda = 3$ ,  $m = 0.5$ ,  $A_{\text{cap}} = 1$ ,  $\alpha_e = 0$

**Fig. 3.** Variation in the relative thickness of inner layer in adiabatic combustion regime:  $L_{i0} = (1) 20$ , (2) 30, and (3) 40;  $\Lambda = 3$ ,  $m = 0.5$ ,  $A_{\text{cap}} = 1$ , and  $\alpha_e = 0$



В неадиабатических условиях  $\chi_e \neq 0$  возможно формирование слоевой структуры с инертным слоем толщиной меньше, чем начальное значение  $y_L$ . Изменение по времени толщины инертного слоя в этом случае в зависимости от параметра капиллярного течения  $A_{\text{cap}}$  иллюстрирует рис. 4. Более интенсивное впитывание расплава в правую часть композиции с ростом  $A_{\text{cap}}$  приводит к увеличению скорости движения границы капиллярного течения  $y_d(t)$ , определяющей текущую толщину инертного слоя. Соответственно время начала пропитки расплавом левой части слоевой композиции уменьшается. Падение температуры пористого каркаса ниже температуры плавления приводит к остановке капиллярного течения и кристаллизации расплава. Часть металла внутреннего слоя III (рис. 1), не затекшая в поры, так и остается в виде слоя, разделяющего слои композиционного материала.



**Рис. 4.** Изменение относительной толщины внутреннего слоя в неадиабатическом режиме горения: 1 –  $A_{\text{cap}} = 1$ , 2 –  $A_{\text{cap}} = 2$ , 3 –  $A_{\text{cap}} = 3$ ,  $\Lambda = 3$ ,  $m = 0.5$ ,  $L_{i0} = 20$ ,  $\alpha_e = 3 \cdot 10^{-5}$

**Fig. 4.** Variation in the relative thickness of inner layer in non-adiabatic combustion regime:  $A_{\text{cap}} = (1)$  1, (2) 2, and (3) 3;  $\Lambda = 3$ ,  $m = 0.5$ ,  $L_{i0} = 20$ , and  $\alpha_e = 3 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, в результате организации горения в трехслойном пакете можно реализовать различные технологические процессы: пропитку, наплавку. Практическим приемом регулирования структуры конечного продукта является варьирование толщин внутреннего слоя, пористости, дисперсности (изменяющей эффективный диаметр капилляров и теплопроводность), соотношения реагентов, дополнительный подогрев или охлаждение слоевого пакета, замена металлической фольги слоем порошка для уменьшения теплопроводности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мерджанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007.
2. Байдельдинова А.Н., Ксандопуло Г.И. Квазиadiaбатический самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов в композициях из сопряженных слоев // Неорганические материалы. 2003. Т. 39. № 10. С.1204–1207.
3. Ксандопуло Г.И., Байдельдинова А.Н. Горение в системе сопряженных слоев и высокотемпературный синтез материалов // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77. Вып. 3. С. 370–374.
4. Sytshev A.E., Vrel D., Boyarchenko O.D., Roshchupkin D.V., Sachkova N.V. Combustion synthesis in bi-layered (Ti–Al)/(Ni–Al) system // J. Materials Processing Technology. 2017. V. 240. P. 60–67.
5. Shchukin A.S., Sytshev A.E. Fine structure of transition layer formed between NiAl melt and W substrate during self-propagating high-temperature synthesis // Letters on Materials. 2017. V. 7 (3). P. 244–248.
6. Писклов А.В., Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Безгазовое горение слоевого пакета в неadiaбатических условиях // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2006. № 5. С. 102–108.
7. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. К теории процессов самораспространяющегося синтеза в слоевых системах // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 5. С. 160–166.
8. Prokof'ev V. G., Smolyakov V. K. Gasless combustion in two-layer structures: A theoretical model // Intern. J. of SHS. 2013. V. 22. No. 1. P. 5–10.
9. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Безгазовое горение системы термически сопряженных слоев // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 1. С. 70–75.
10. Алигожина К.А., Князева А.Г. Моделирование распространения твердофазной реакции в условиях сопряженного теплообмена // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 4. С. 48–57.
11. Фирсов А.Н., Шкадинский К.Г. Нестационарные режимы горения безгазовых конденсированных веществ, периодически разбавленных инертными добавками // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24. № 6. С. 93–98.
12. Кришеник П.М., Мерджанов А.Г., Шкадинский К.Г. Режимы фронтального превращения высокоэнергетических структурированных гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 2. С. 51–61.
13. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. К теории горения и синтеза композиционных материалов в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 4. С. 22–28.
14. Хейфиц Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М.: Химия, 1982.
15. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959.
16. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. М.: Наука, 1975.
17. Smolyakov V.K., Prokofiev V.G. The theory of self-propagating high-temperature-synthesis of functionally gradient materials // Int. J. SHS. 2003. V.12. No. 1. P. 1–10.
18. Крайнов А.Ю. Влияние теплофизических характеристик инертной преграды и теплопотерь на распространение волны горения // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 6. С. 16–19.

Статья поступила 26.02.2018 г.

Prokof'ev V.G., Lapshin O.V., Smolyakov V.K. (2018) MACROKINETICS OF COMBUSTION OF LAYERED COMPOSITIONS WITH A LOW-MELTING INERT LAYER. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 52. pp. 102–113

DOI 10.17223/19988621/52/10

The mathematical model of gasless combustion of a layered composition is considered. Inner layer of the composition consists of an inert low-melting metal. Other layers consist of a highly exothermic gasless mixture. In the inner layer, metal melts during combustion of the adjacent layers. Affected by surface tension forces, the melt flows into the porous combustion products of gasless mixture to form a composite material. The capillary flow of melt in the porous channels is

limited by skeleton temperature equal to the melting point. The time spent for passing through an inert layer by combustion wave is found depending on the thickness and thermal conductivity of the layer. The modes of synthesis for layered composite materials in combustion regime are determined. The dynamics of structure formation of the composite materials is considered depending on the thickness of inner metal layer and on the external heat exchange coefficient.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, porous medium, capillary flow, composite material, modeling

*PROKOF'EV Vadim Gennad'evich* (Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Tomsk State University, Tomsk Research Center, Russian Federation). E-mail: [pvg@ftf.tsu.ru](mailto:pvg@ftf.tsu.ru)

*LAPSHIN Oleg Valentinovich* (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk Research Center, Russian Federation). E-mail: [ovlap@mail.ru](mailto:ovlap@mail.ru)

*SMOLYAKOV Victor Kuz'mich* (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk Research Center, Russian Federation)

#### REFERENCES

1. Merzhanov A.G., Mukas'yan A.S. (2007) *Tverdoplamennoe gorenie* [Solid-flame combustion]. Moscow: Torus Press.
2. Baideldinova A.N., Ksandopulo G.I. (2003) Quasi-adiabatic self-propagating high-temperature synthesis in layered systems. *Inorganic Materials*. 39(10). pp. 1039–1042. DOI: 10.1023/A:1026082924037.
3. Baideldinova A.N., Ksandopulo G.I. (2004) Combustion in a system of conjugated layers and high-temperature synthesis of materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 77(3). pp. 364–368. DOI: 10.1023/B:RJAC.0000031272.43669.c0.
4. Sytshev A.E., Vrel D., Boyarchenko O.D., Roshchupkin D.V., Sachkova N.V. (2017) Combustion synthesis in bi-layered (Ti–Al)/(Ni–Al) system. *Journal of Materials Processing Technology*. 240. pp. 60–67. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.010.
5. Shchukin A.S., Sytshev A.E. (2017) Fine structure of transition layer formed between NiAl melt and W substrate during self-propagating high-temperature synthesis. *Letters on materials*. 7 (3). pp. 244–248. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-3-244-248.
6. Pisklov A.V., Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2006) Bezgazovoe gorenie sloevogo paketa v neadiabaticeskikh usloviyakh [Gasless combustion of layered package under nonadiabatic conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya – Proceedings of Higher Schools. Nonferrous Metallurgy*. 5. pp. 102–108.
7. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2012) On the theory of self-propagating high-temperature synthesis in layered systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 48(5). pp. 636–641. DOI: 10.1134/S0010508212050152.
8. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2013) Gasless combustion in two-layer structures: A theoretical model. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.* 22(1). pp. 5–10. DOI: 10.3103/S1061386213010093.
9. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2016) Gasless combustion of a system of thermally coupled layers. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 52(1). pp. 62–66. DOI: 10.1134/S0010508216010081.
10. Aligozhina K.A., Knyazeva A.G. (2017) Modeling the solid phase reaction distribution in the case of conjugate heat exchange. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 53(4). pp. 411–419. DOI: 10.1134/S0010508217040050.
11. Firsov A.N., Shkadinskiy K.G. (1988) Nonstationary combustion regimes of gasless condensed substances periodically diluted by inert admixtures. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 24(6). pp. 726–730. DOI: 10.1007/BF00740418.
12. Krishenik P.M., Merzhanov A.G., Shkadinskiy K.G. (2005) Frontal transformation modes of structured energetic heterogeneous systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 41(2). pp. 164–173. DOI: 10.1007/s10573-005-0019-x.

13. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. (2014) On the theory of combustion and synthesis of composite materials in the field of mass forces. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 50(4). pp. 387–392. DOI: 10.1134/S0010508214040042.
14. Heyfits L.I., Neymark A.V. (1982) *Mnogofaznye protsessy v poristykh sredakh* [Multiphase processes in porous media]. Moscow: Chemistry.
15. Levich V. (1962) *Physicochemical Hydrodynamics*. Prentice Hall.
16. Frenkel J. (1955) *Kinetic Theory of Liquids*. Dover Publications.
17. Smolyakov V.K., Prokof'ev V.G. (2003) The theory of self-propagating high-temperature-synthesis of functionally gradient materials. *Intern. J. of SHS*. 12(1). pp.1–10.
18. Krainov A.Yu. (1987) Influence of thermophysical characteristics of an inert obstacle and heat losses on combustion wave propagation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 23(6). pp. 676–679. DOI: 10.1007/BF00742519.