

МОДЕЛЬ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В РЕАГИРУЮЩЕЙ ДИСПЕРСНОЙ СМЕСИ В УСЛОВИЯХ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ

УДК 536:46

О. Б. Ковалев, В. М. Фомин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [1] — эффективный метод получения широкого класса тугоплавких соединений, представляющий собой сильнотемпературное физико-химическое взаимодействие реагентов в конденсированной фазе.

Методы описания процессов в волне СВС первоначально основывались на тепловой теории [1], которая строилась в предположении наличия температурной гомогенизации среды с постоянными теплофизическими характеристиками, отсутствия массопереноса реагентов и математически сводилась к уравнениям теплопереноса и кинетики химических реакций:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q \frac{\partial \beta}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \Phi(T). \quad (2)$$

Здесь T — температура; β — глубина превращения; c, ρ — удельная теплоемкость и плотность; λ — эффективный коэффициент теплопроводности; Q — теплота реакции; E — энергия активации; k_0 — предэкспонент; $\Phi(T)$ — кинетическая функция. Тепловая теория [1] хорошо описывает случай узких зон реакций с полным превращением веществ в них. Описание широких зон превращения с химическими стадиями [2], фазовыми переходами [3, 4], капиллярным растеканием [5], структурными превращениями [6] и т. д. проводилось путем представления кинетической функции $\Phi(T)$, получаемой эмпирически [2] либо теоретически [3–6]. Тепловая теория [1] и ее различные квазигомогенные модификации [2–6] не смогли дать удовлетворительного описания структуры волны синтеза. Представление об узости зоны химического реагирования позволяет лишь приближенно получать зависимости скорости распространения волны от начальной температуры и других параметров системы. В большинстве случаев экспериментальные профили температуры не отвечают концепции узких зон реагирования. Структура волны в реальных процессах имеет изломы, изотермические участки и не может быть описана в рамках тепловой теории.

Модель безгазового горения с фазовыми превращениями [7] также основана на тепловой теории, в которой для описания фазовых переходов используется представление теплоемкости вещества δ -функцией Дирака. Такое представление предполагает, что фазовый переход происходит мгновенно. В действительности фазовое превращение (плавление или кристаллизация) протекает во времени и определяется собственной кинетикой процесса, что оказывает свое влияние на структуру волны синтеза.

В [8–10] предложена модель безгазового горения, в которой процессы реакционной диффузии рассматриваются на уровне ячейки смеси с учетом масштаба гетерогенности и многостадийности превращений, что позволило дать первые количественные оценки СВС. Однако вопрос о химическом составе и структуре конечного продукта остается открытым.

В ряде работ [11–13] предпринята неудачная попытка построить гетерогенную модель СВС. Опираясь в целом на уравнения механики гетерогенных сред [14], автор [11–13]

ввел кинетическое уравнение на глубину превращения, поэтому его модель мало чем отличается от тепловой теории. Кроме того, при описании фазовых переходов аналогично [7] используется δ -функция Дирака. В результате все достоинства гетерогенного подхода оказались сведенными на нет.

Макроструктурные превращения, которые включают в себя химические реакции, структурные, фазовые переходы и тепломассообменные процессы в волне синтеза имеют различную кинетику и как следствие оказываются растянутыми во времени и в пространстве. За фронтом волны формируется, как правило, многофазный продукт с заранее неизвестным составом, внутренней структурой и свойствами. Очевидно, что горение таких систем является гетерогенным в силу их гетерогенной природы. Перспективное, на наш взгляд, направление в развитии теории СВС — последовательное использование основных принципов механики гетерогенных сред [14, 15].

Внутреннюю исходную структуру смеси порошков представим состоящей из элементарных ячеек (ЭЯ), каждая из которых включает частицу одного компонента, окруженную слоем частиц другого компонента. Такая структура характерна для смесей Ni + Al, Zr + Al, Ti + C, Ta + C и др. [1]. Химическое взаимодействие между веществами происходит через поверхность контактов в режиме реакционной диффузии, модель которой рассмотрим на примере смеси порошков двух металлов A и B. В большинстве случаев частицы одного из реагентов плавятся, и происходит его растекание в капиллярах системы с обволакиванием частиц другого реагента, что повышает поверхность контактов и интенсифицирует процесс реакционной диффузии. В результате реакции синтеза образуется конечный продукт в жидком или твердом состоянии. Профиль температуры в волне горения характеризуется толщиной зоны реагирования и отражает все особенности структурных, фазовых и химических превращений веществ.

Число частиц A , приходящихся на одну частицу B , рассчитывается по формуле

$$N_{AB} = \alpha_A \rho_B R_B^3 / (\alpha_B \rho_A R_A^3).$$

Например, для системы Ni + Al, взятой в стехиометрическом соотношении [16] в долях по весу $\alpha_A = 0,315$, $\alpha_B = 0,685$, с плотностями $\rho_A = 2,7$ г/см³ для Al, $\rho_B = 8,4$ г/см³ для Ni и радиусами частиц $R_A = 5$ мкм, $R_B = 20$ мкм расчетное значение $N_{AB} = 91$. При заданной начальной пористости m_1^0 объем ЭЯ смеси V_s представим состоящим из суммы объемов частиц A , B и объема пор: $V_s = V_B + N_{AB}V_A + m_1^0V_s$, тогда для радиуса ячейки R_s получим выражение $R_s = (1 - m_1^0)^{-1/3} (1 + \alpha_A \rho_B / \alpha_B \rho_A)^{1/3} R_B$, из которого следует $R_s \approx 2R_B$. Согласно [1], для большинства осуществленных СВС-процессов толщина волны горения $l_* \sim 4 \div 5$ мм, откуда $R_s \ll l_*$.

Эволюцию структуры теплоизолированной дисперсной смеси в ходе химических и фазовых превращений и тепломассообменных процессов в волне горения будем изучать на уровне ЭЯ, исходя из представлений о поведении компонентов системы с повышением температуры. Пространственный профиль температуры предполагается состоящим из трех зон. Первая зона зернистая, температура в ней изменяется от начальной T_0 до температуры плавления легкоплавких частиц A T_A ($T_0 \leq T \leq T_A$). Вторая зона отвечает области изменения температуры в промежутке между точками плавления компонентов A и B ($T_A \leq T \leq T_B$) и состоит из расплава A со взвешенными частицами B и пузырьками газа. На границе первой и второй зон при $T = T_A + \Delta T$ (ΔT — малая величина) появляется промежуточная жидкая фаза металла A , которая обволакивает тугоплавкие частицы B . Время полного перехода частиц A в жидкое состояние зависит от их размера и скорости теплового фронта. По мере плавления частиц A в ЭЯ формируется новая пористость.

Предположим, что из промежутков между частицами A образуются изолированные заполненные газом поры сферической формы. Если считать, что число промежутков между частицами примерно равно числу частиц A , то можно вычислить начальный радиус

образующихся пузырьков $a_0 = R_A(m_1^0/(1 - m_1^0))^{1/3}$. После того как расплавится весь компонент A , ЭЯ будет состоять из одной частицы B , окруженной расплавом A , содержащим пузырьки газа. Химическое взаимодействие компонентов A и B в режиме реакционной диффузии начинается на стадии плавления A , когда твердые частицы B растворяются в расплаве A . На поверхности частиц B образуется твердофазный слой AB . Процессом, лимитирующим горение, является рост слоя новой фазы, который определяется взаимной диффузией атомов веществ A и B через слой AB .

Третья зона соответствует области изменения температуры от точки плавления компонента B до температуры горения T_* ($T_B \leq T \leq T_*$). В этой области идет формирование зерен новой фазы, центрами которых являются частицы B . Зерна могут состоять первоначально из нескольких слоев: верхнего слоя новой фазы, затем жидкого слоя расплава B и твердого, еще не расплавившегося ядра частицы B . По мере роста слоя AB идет потребление жидкого компонента A , возникают контакты между зернами новой фазы, и среда из жидкой суспензии с уменьшением доли жидкой фазы превращается в твердое пористое тело с определенной зернистостью. При этом изолированные поры-пузырьки сливаются в промежутках между зернами новой фазы, образуя связную пористую структуру, частично заполненную жидким компонентом A или газом. После того как какой-либо из компонентов полностью израсходуется, процесс синтеза завершается. Предполагается, что во всех трех зонах газ инертен и может участвовать только в теплообменных процессах. Таким образом, каждому значению температуры соответствует вполне определенное структурное состояние вещества.

Математическое моделирование процессов в волне СВС осложнено рядом обстоятельств, связанных с эволюцией структуры гетерогенной среды. Описание течения газа и межфазного взаимодействия осложнено трансформацией пористости. Трудности в описании напряженно-деформированного состояния, с одной стороны, вызваны обращением в нуль в точке плавления частиц тензора фиктивных напряжений, отвечающего за межгранулярное взаимодействие в зернистом слое, а с другой — возникновением контакта между зернами новой фазы и образованием пористого продукта.

Фазовые переходы и реакцию синтеза формально представим в виде $A_{\tau} \xrightarrow{J_1} A_{\text{ж}} - Q_1^0$, $B_{\tau} \xrightarrow{J_2} B_{\text{ж}} - Q_2^0$, $\nu_1 A_{\text{ж}} + \nu_2 B_{\text{ж}} \xrightarrow{J_3} \nu_3 AB_{\tau} + Q_3$, где J_j , Q_j — скорости и теплоты процессов ($j = 1, 2$ — плавление частиц A, B , $j = 3$ — реакция синтеза AB); ν_j — стехиометрические коэффициенты; индексами τ и ж помечены твердое и жидкое состояние вещества.

Рассматривается двухскоростная и двухтемпературная модель среды, в которой ρ_i — средние плотности, v_i — скорости, T_i — температуры газа ($i = 1$) и к-фазы ($i = 2$).

Для газа и пяти компонентов к-фазы уравнения сохранения массы имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_1 + \frac{\partial}{\partial x_k} \rho_1 v_{1k} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{2j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \rho_{2j} v_{2k} = \varphi_j, \quad j = \overline{1, 5} \quad (4)$$

$$(\varphi_1 = -\mu_1 J_1, \quad \varphi_2 = \mu_1(J_1 - \nu_1 J_3), \quad \varphi_3 = -\mu_2 J_2, \quad \varphi_4 = \mu_2(J_2 - \nu_2 J_3), \quad \varphi_5 = \mu_3 \nu_3 J_3),$$

где по повторяющемуся индексу k идет суммирование; v_{1k} , v_{2k} ($k = 1, 2, 3$) — компоненты векторов скорости v_1 , v_2 ; $\rho_{2j} = m_{2j} \rho_{2j}^0$, ρ_{2j}^0 , m_{2j} — средние плотности, плотности материала компонентов к-фазы и их объемные доли ($j = 1, 2$ — твердый и жидкий компоненты A , $j = 3, 4$ — твердый и жидкий компоненты B , $j = 5$ — твердый продукт AB); μ_1, μ_2, μ_3 — молекулярные массы веществ A, B и AB соответственно. Материалы исходных частиц и продукта удовлетворяют условию несжимаемости: $\rho_{2j}^0 = \text{const}$.

Введем в рассмотрение параметры

$$\alpha = \begin{cases} \rho_{22}/(\rho_{21} + \rho_{22}), & \rho_{21} + \rho_{22} \neq 0, \\ 1, & \rho_{21} + \rho_{22} = 0, \end{cases} \quad \beta = \rho_{25}/(\rho_{22} + \rho_{25}),$$

которые изменяются от 0 до 1 и характеризуют степени плавления частиц A и образование продукта AB соответственно. Такой выбор параметров удовлетворяет предельным переходам, которые обсуждаются ниже. С помощью параметров α и β запишем уравнения для радиуса a и числа пузырьков n :

$$\alpha(1 - \beta)m_1 = (4/3)\pi a^3 n; \quad (5)$$

$$n = \alpha(1 - \beta)N_A. \quad (6)$$

Здесь m_1, ρ_1 — объемная концентрация, средняя плотность газа; N_A — число исходных частиц A в смеси. Соотношения (5), (6) описывают изменение количества и радиус пузырьков при переходе газа из зернистого слоя, имеющего связную пористость, в жидкость по мере плавления частиц A и, наоборот, из жидкости в пористый продукт.

Рассматриваются малые деформации, которые не могут оказать существенного влияния на изменение температуры твердых и жидких фаз, иными словами, работа внутренних межгранулярных сил мала по сравнению с теплом, производимым химической реакцией синтеза. Изменение внутренней энергии газа и к-фазы определяется притоком тепла:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_1 e_1 + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho_1 e_1 v_{1k} - q_{1k}) = -F_{\mu j} (v_{1j} - v_{2j}) + g_{12}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_2 e_2 + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho_2 e_2 v_{2k} - q_{2k}) = F_{\mu j} (v_{1j} - v_{2j}) + g_{21}. \quad (8)$$

Здесь $\rho_i, e_i, q_{ik} = \lambda_i m_i \partial T_i / \partial x_k, m_i, \lambda_i$ — средние плотности, внутренние энергии, тепловые потоки, объемные концентрации и средние коэффициенты теплопроводности в газе ($i = 1$) и в к-фазе ($i = 2$):

$$\rho_2 = \rho_2^0 m_2 = \sum_{j=1}^5 \rho_{2j}^0 m_{2j}, \quad e_1 = c_1(T_1 - T_0) + e_1^0, \quad e_2 = \left(\sum_{j=1}^5 \rho_{2j} e_{2j} \right) / \rho_2,$$

$$e_{21} = c_{21}(T_2 - T_0) + e_{21}^0, \quad e_{22} = e_{21} + Q_1^0, \quad e_{23} = c_{23}(T_2 - T_0) + e_{23}^0, \quad e_{24} = e_{23} + Q_2^0,$$

$$e_{25} = c_{25}(T_2 - T_0) + e_{25}^0, \quad \lambda_2 = \left(\sum_{j=1}^5 \lambda_{2j} m_{2j} \right) / m_2, \quad m_2 = \sum_{j=1}^5 m_{2j},$$

$$g_{21} = -g_{12} = (1 - \alpha)q_{21}^{(1)} + \alpha(1 - \beta)q_{21}^{(2)} + \alpha\beta g_{21}^{(3)};$$

$e_{2j}, c_{2j}, \lambda_{2j}$ — внутренние энергии, удельные теплоемкости и коэффициенты теплопроводности компонентов к-фазы ($j = 1, 2$ — твердый и жидкий компоненты $A, j = 3, 4$ — твердый и жидкий компоненты $B, j = 5$ — твердый продукт AB); e_{2j}^0 — удельные внутренние энергии при температуре T_0 , так что теплота химической реакции синтеза $Q_3^0 = (\mu_1 \nu_1 e_{21}^0 + \mu_2 \nu_2 e_{23}^0 - \mu_3 \nu_3 e_{25}^0) / (\mu_3 \nu_3)$; $g_{12}^{(i)}, g_{21}^{(i)}$ — потоки тепла за счет внутреннего теплообмена между газом и к-фазой в зернистом слое ($i = 1$), в твердожидкой суспензии ($i = 2$) и пористом конечном продукте ($i = 3$); F_{μ} — силы межфазного взаимодействия.

Введем комбинированные средние тензоры напряжений в газе Γ_1^{ke} и к-фазе Γ_2^{ke} в виде

$$\Gamma_1^{ke} = -m_1 p_1 \delta^{ke}, \quad \Gamma_2^{ke} = (1 - \alpha)[\sigma_{21}^{ke} - m_2 p_1 \delta^{ke}] + \alpha(1 - \beta)m_2 \sigma_{22}^{ke} + \alpha\beta[\sigma_{23}^{ke} - m_2 p_1 \delta^{ke}],$$

где σ_{2j}^{ke} — тензоры фиктивных напряжений в зернистом скелете ($j = 1$) и пористом твердом продукте ($j = 3$); σ_{22}^{ke} — тензор напряжений в твердожидкой суспензии; p_1 — давление газа:

$$p_1 = \rho_1^0 RT_1; \quad (9)$$

$$\sigma_{2j}^{ke} = m_2(\lambda^{(j)} \varepsilon_2 \delta^{ke} + 2\mu^{(j)} \varepsilon_2^{ke}) + m_2 \beta^{(j)} k^{(j)} p_1 \delta^{ke};$$

$$\sigma_{22}^{ke} = - \left[m_1 \left(p_1 - \frac{2\Sigma}{a_0} \right) + m_2 \rho_2^{(2)} \right] \sigma^{ke}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_2^{ke} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{2k}}{\partial x_e} + \frac{\partial v_{2e}}{\partial x_k} \right);$$

R — газовая постоянная; $\lambda^{(j)}$, $\mu^{(j)}$ (коэффициенты Ламе), $k^{(j)}$ (модули всестороннего сжатия), $\beta^{(j)}$ (коэффициенты сжимаемости) — средние по смеси эффективные коэффициенты ($j = 1, 3$); Σ — коэффициент поверхностного натяжения; $p_2^{(1)}$, $p_2^{(2)}$, $p_3^{(3)}$ — давление в зернистом скелете, в жидком расплаве и в пористом продукте; ε_2^{ke} — тензор фиктивных деформаций; $\varepsilon_2 = (1/3)(\varepsilon_2^{11} + \varepsilon_2^{22} + \varepsilon_2^{33})$.

Уравнения импульсов в газе и к-фазе для всей области изменения температур запишем как

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_1 v_{1k} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_1 v_{1k} v_{1j} - \Gamma_1^{kj}) = -R_k; \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_2 v_{2k} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_2 v_{2k} v_{2j} - \Gamma_2^{kj}) = R_k. \quad (11)$$

Здесь $R_k = (1 - \alpha)R_k^{(1)} + \alpha(1 - \beta)R_k^{(2)} + \alpha\beta R_k^{(3)}$ ($k = 1, 2, 3$); $R_k^{(1)} = F_{\mu k}^{(1)} - p_1 \partial m_1 / \partial x_k$; $R_k^{(2)} = F_{\mu k}^{(2)} - \sigma_{22}^{kj} \partial m_1 / \partial x_j$; $R_k^{(3)} = F_{\mu k}^{(3)} - p_1 \partial m_1 / \partial x_k$.

При описании межфазного взаимодействия учитываются только сила Архимеда и сила трения из-за вязкости несущей фазы, всеми остальными силами пренебрегается. Поскольку указанные выше температурные зоны отличаются внутренней структурой и несущими фазами, то в каждой из них рассматривается своя сила трения: $\mathbf{F}_\mu^{(1)}$, $\mathbf{F}_\mu^{(2)}$, $\mathbf{F}_\mu^{(3)}$.

Согласно модели пластического газа [17], межгранулярное фиктивное давление в пористом твердом теле при нагружении зависит от пористости и плотности:

$$p_f = \varphi(m_1, \rho_2^0) = \begin{cases} \rho_2^0 m_* c_*^2 (m_* / m_1 - 1), & m_1 < m_*, \\ 0, & m_1 \geq m_* \end{cases}$$

(m_* , c_* — пористость и скорость звука в предельно сжатом пористом теле).

Уравнения совместного деформирования представим в виде

$$m_2(p_2^{(k)} - p_1) = \varphi_k(m_1, \rho_2^0, m_*^{(k)}, c_*^{(k)}), \quad k = 1, 3, \quad (12)$$

где $k = 1$ соответствует зернистому слою, а $k = 3$ — пористому продукту.

Уравнение деформирования пузырьков запишем в форме Рэлея — Ламба [14]:

$$a \frac{d^2 a}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 = \frac{p_1 - p_2^{(2)} - 2\Sigma/a}{\rho_{22}^0}. \quad (13)$$

Дополняя полученные уравнения соотношением

$$m_1 + \sum_{j=1}^5 m_{2j} = 1, \quad (14)$$

получим систему уравнений (3)–(14) с неизвестными функциями:

$$\rho_1^0, m_1, m_2, \quad (j = \overline{1,5}), \quad v_1, v_2, T_1, T_2, p_1, a, n, p_2^{(j)} \quad (j = 1, 2, 3).$$

Определение кинетики фазовых переходов и химических превращений, сил межфазного и теплового взаимодействия является предметом отдельного обсуждения и в данной работе не рассматривается.

Выбор параметров α и β в указанном выше виде обусловлен необходимостью выполнения следующих предельных переходов. Во-первых, при $\alpha \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0$ (3)–(14) переходят в уравнения механики насыщенных пористых сред [15], при $\alpha \rightarrow 1, \beta \rightarrow 0$ получаются уравнения идеальной несжимаемой жидкости со взвешенными твердыми частицами и пузырьками газа [14], а при $\alpha \rightarrow 1, \beta \rightarrow 1$ имеем модель твердого пористого тела [14, 15]. Во-вторых, указанные предельные значения параметров согласованы с получаемым составом конечного продукта. Если смесь порошков взята в стехиометрическом соотношении, то компоненты реагируют полностью. Конечный продукт получается чистый, без примесей, с зернистой структурой и связной пористостью, заключенной между зёрнами. В случае, когда исходная смесь содержит частицы A с недостатком, конечный продукт также имеет зернистую структуру, но зёрна могут состоять из верхнего слоя вещества AB и внутреннего ядра вещества B в жидком или частично твердом состоянии. Если смесь содержит частицы A с избытком, то имеем в конечном продукте расплав A со взвешенными частицами AB и пузырьками газа.

Таким образом, модель преобразований структуры математически свелась к (3)–(14) без явного выделения температурных зон, отвечающих за структурные превращения.

Модель позволяет рассматривать процесс СВС в условиях сжатия при давлениях, допускающих предположение о несжимаемости материалов компонентов в твердом и жидком состоянии. В зависимости от условий СВС можно рассчитывать формирование структуры конечного продукта, состоящей из изолированных (сферических) и связных пор с определенной зернистостью и химическим составом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез // Физическая химия. Современные проблемы / Под ред. А. М. Колотыркина. М.: Химия, 1983. С. 6–45.
2. Мержанов А. Г. Новые элементарные модели горения второго рода // Докл. АН СССР. 1977. Т. 233, № 6. С. 1130–1133.
3. Околович Е. В., Мержанов А. Г., Хайкин Б. И., Шкадинский К. Г. Распространение волны горения в плавящихся конденсированных смесях // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 3. С. 326–335.
4. Некрасов Е. А., Тимохин А. М., Пак А. Т. К теории безгазового горения с фазовыми превращениями // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 79–85.
5. Некрасов Е. А., Максимов Ю. М., Зиатдинов М. Х., Штейнберг А. С. Влияние капиллярного растекания на распространение волны горения в безгазовых системах // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 26–32.
6. Смоляков В. К. Влияние структурных изменений на горение прессовок металлических порошков в газе // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 18–26.
7. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. Безгазовое горение с фазовыми превращениями // Докл. АН СССР. 1977. Т. 236, № 5. С. 1133–1136.
8. 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. С. 207–212.

9. Некрасов Е. А., Максимов Ю. М., Алдушин А. П. Расчет параметров волны горения в безгазовых системах // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255, № 3. С. 656–659.
10. 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.
11. Смоляков В. К. К теории макроструктурных превращений при горении прессовок металлических порошков в газе // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 1. С. 21–28.
12. Смоляков В. К. Изменение пористости при горении гетерогенных систем с частично газообразным продуктом // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 13–21.
13. Смоляков В. К. О моделировании высокотемпературного синтеза в пресс-формах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 49–54.
14. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987.
15. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
16. Найбороденко Ю. С., Итин В. И. Исследование процесса безгазового горения смеси порошков разнородных металлов // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 12, № 3. С. 343–352.
17. Рахматулин Х. А., Демьянов Ю. А. Расчеты на прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М.: Физматгиз, 1961.

Поступила в редакцию 20/X 1995 г.
