

О ПОЛУЧЕНИИ МАЛОПОРИСТЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ СИЛОВОМ СВС-КОМПАКТИРОВАНИИ

В. К. Смоляков

Томский филиал Института структурной макрокинетики РАН, 634050 Томск

На основе двухскоростной квазистационарной модели горения малогазовых составов в пресс-форме под действием постоянной нагрузки анализируется возможность получения высокоплотных материалов при различных схемах одностороннего прессования. Рассматриваются структурные превращения в системах с легкоплавким компонентом в области существования жидкой фазы. Показано, что получение компактных продуктов зависит от количества жидкой фазы и соотношения плотностей исходных и конечных веществ. Получены формулы для оценки необходимых нагрузок при получении малопористых продуктов. Анализируется влияние добавок легкоплавкого разбавителя на получение композиционных материалов при силовом СВС-компактировании.

Получение высокоплотных материалов при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе является важной технологической задачей. Ее актуальность обусловлена перспективностью использования синтезируемых в волне горения тугоплавких неорганических соединений и композиций на их основе. В наиболее интересных с точки зрения практики системах получить высокоплотные продукты при обычном СВ-синтезе не удается. Уменьшить пористость и улучшить качество продукта позволяет совмещение процесса горения с прессованием — силовое СВС-компактирование. В настоящее время в основном реализуемый способ компактирования [1, 2] разделяет во времени стадии синтеза и прессования. Прессованию подвергаются твердые или содержащие малую долю жидкой фазы продукты [3], не остывшие после синтеза, что требует достаточно больших нагрузок. Основная причина разделения стадий — растворенные в металлическом расплаве газообразные примеси. После определенной выдержки и понижения температуры кристаллизующаяся жидкость выделяет растворенные газы и силовое компактирование проходит более эффективно. Время дегазации (по терминологии [1] время задержки прессования) является одним из главных параметров, определяющих качество продукта. Известны также эксперименты по воздействию нагрузки непосредственно на горящий образец [4, 5].

В теории и практике технологического горения разработаны приемы, уменьшающие

содержание и влияние летучих примесей на структуру продукта. К ним относятся термовакуумная обработка исходной смеси [6], уменьшение давления газа в горящей шихте (вакуумирование) и обеспечение беспрепятственной разгрузки давления через специальные отверстия в формообразующей оснастке. Использование этих приемов дает возможность совместить синтез с прессованием. Совмещение стадий позволило бы упростить технологические операции, уменьшить усилия прессования и напряжения в конечных продуктах. Кроме того, компактирование во фронте горения снимает проблему неоднородности нагрева заготовки по длине и связанную с ним неравномерность распределения плотности. В настоящей работе анализируется возможность совместного варианта СВС-компактирования для различных технологических схем организации процесса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваются квазистационарные адиабатические режимы горения малогазовой смеси в абсолютно гладкой жесткой пресс-форме под действием постоянной нагрузки N . Исходная предварительно спрессованная смесь и тугоплавкие продукты синтеза предполагаются несжимаемыми, один из компонентов считается легкоплавким. В результате химического взаимодействия образуются тугоплавкий и газообразный продукты. Уплотнение вещества происходит за счет уменьшения пористости в зоне существования жидкой фазы.

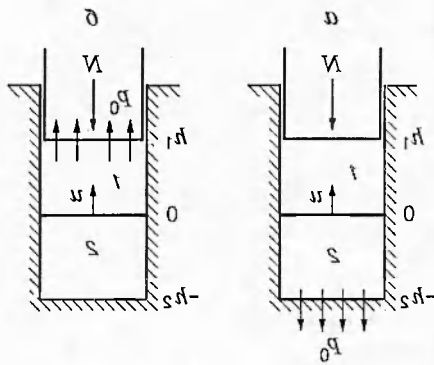


Рис. 1. Схема силового СВС-компактирования в спутном режиме при истечении газообразного продукта через дно пресс-формы (а) и пуансон (б):

1 — продукты, 2 — исходная смесь

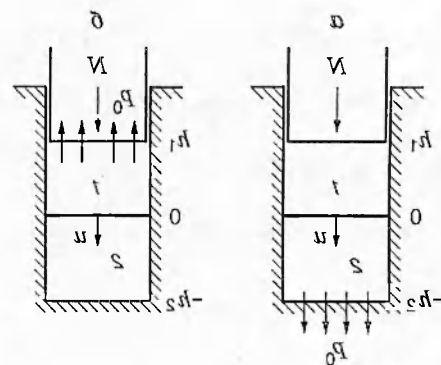


Рис. 2. Схема силового СВС-компактирования во встречном режиме при истечении газообразного продукта через дно пресс-формы (а) и пуансон (б):

1 — исходная смесь, 2 — продукты

Для одностороннего прессования возможны следующие технологические схемы:

1) волна горения распространяется от пуансона к дну пресс-формы (спутный режим) с истечением газа через дно пресс-формы (рис. 1,а) или через пуансон (рис. 1,б);

2) пуансон движется навстречу фронту (встречный режим) с разгрузкой давления через дно пресс-формы (рис. 2,а) или через отверстия в пуансоне (рис. 2,б).

Математическая модель, описывающая встречный режим, включает балансные соотношения для твердой, газовой фаз и продукта, уравнения теплопроводности, фильтрации газа в порах, химической реакции и равновесия [7]:

$$\frac{d}{dz} [m\rho_1(u + v_1)] = \mu J, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} [(1 - m)\rho_2(u + v_2)] = -\mu J, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} [(1 - m)\rho_2\alpha(u + v_2)] = J, \quad (3)$$

$$[c_1\rho_1m(u + v_1) + c_2\rho_2(1 - m)(u + v_2)] \frac{dT}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\lambda \frac{dT}{dz} \right) + QJ, \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dz} = \frac{3\mu_1(1 - m)(v_2 - v_1)}{16 R_0^2} \text{Re } C, \quad (5)$$

$$(u + v_2) \frac{d\alpha}{dz} = k(T)F(\alpha), \quad (6)$$

$$\frac{d}{dz} [(1 - m)\sigma + p_L - mp] = 0. \quad (7)$$

Здесь α — глубина превращения по конденсированному продукту; m — пористость; T — температура; u — скорость горения; v_i, ρ_i — скорость и плотность газовой ($i = 1$) и конденсированной ($i = 2$) фаз; μ — доля газообразного продукта; $\rho_2 = \rho_{см}\rho_{пр}/[\rho_{пр} + \alpha(\rho_{см} - \rho_{пр})]$, $\rho_{см}, \rho_{пр}$ — плотности смеси и продукта; z — координата; J — массовая скорость образования конденсированного продукта; p — давление газа; $p_L \approx 3\varepsilon(1 - m)^2/R_0$ — эффективное лапласово давление в конденсированной фазе [8]; ε — поверхностное натяжение; R_0 — радиус характерного элемента структуры; Q — тепловой эффект реакции; $k(T) = k_0 \exp(-E/RT)$, k_0, E — константа, предэкспонент и энергия активации химической реакции; $F(\alpha)$ — кинетический закон взаимодействия; c_1 — теплоемкость газа; $c_2 = c_{пр}\alpha + c_{см}(1 - \alpha)$, $c_{пр}, c_{см} = c_k + (1 - c_0)L\delta(T_m - T)$ — теплоемкости конденсированной фазы, продукта и смеси; $L, T_m, (1 - c_0)$ — теплота, температура плавления и массовая доля легкоплавкого компонента; $\delta(T_m - T)$ — дельта-функция; σ — напряжение в конденсированной фазе; $\lambda \approx \lambda_0(1 - m)$ — коэффициент теплопроводности; λ_0 — константа; для коэффициента сопротивления C приемлем выражение [9]

$$C \approx \frac{4}{3m} \left[1,75 + \frac{150(1 - m)}{m\text{Re}} \right],$$

где $\text{Re} = 2\rho_1 R_0 |v_1 - v_2| / \mu_1$ — число Рейнольдса; μ_1 — вязкость газа.

Граничные условия для встречного режима с истечением газа через дно пресс-формы (см. рис. 1,а):

$$z = -h_2: \quad v_{2,0} = 0, \quad T = T_0, \quad m = m_0,$$

$$\alpha = 0, \quad p = p_0; \quad (8)$$

$$z = h_1: \quad v_{1,r} = v_{2,r}, \quad \frac{dT}{dz} = \frac{dp}{dz} = 0, \quad \alpha = 1;$$

граничные условия при разгрузке давления через пуансон (см. рис. 1,б):

$$z = -h_2: \quad v_{1,0} = v_{2,0}, \quad T = T_0, \quad m = m_0, \\ \alpha = 0, \quad \frac{dp}{dz} = 0; \quad (9)$$

$$z = h_1: \quad \frac{dT}{dz} = 0, \quad \alpha = 1, \quad p = p_0.$$

Здесь v_0, v_r — скорости на холодном и горячем торцах с координатами h_2 и h_1 ; T_0 — начальная температура; p_0 — давление вне образца.

Интеграл уравнения равновесия (7) имеет вид

$$(1 - m)\sigma - mp + p_L = Z, \quad (10)$$

где p_L — лапласово давление. Для схем, представленных на рис. 1, соответственно

$$Z = -N - m^*p_0, \quad (11)$$

$$Z = -(1 - m^*)N - m^*p_0. \quad (12)$$

Здесь m^* — пористость проницаемой части пресс-формы (в данном случае дна), толщина которой пренебрежимо мала по сравнению с длиной фильтрации в образце. Предполагается также, что через отверстия в пресс-форме осуществляется беспрепятственный газообмен между шихтой и внешней средой.

Для получения уравнений, определяющих изменение пористости, необходимо выбрать реологическое соотношение, связывающее напряжение и скорость деформации. В рассматриваемом случае, когда изменение пористости проходит в области существования жидкой фазы, возьмем ньютоновское соотношение

$$\sigma = -p + 2\eta \frac{dv_2}{dz}, \quad (13)$$

где η — вязкость конденсированной фазы. Так как в процессе химического взаимодействия объемные доли твердой φ и жидкой $(1 - \varphi)$ составляющих суспензии изменяются, вязкость представим в виде произведения вязкости текучей составляющей $\eta_*(T) = \eta_0 \exp(-E_*/RT)$, η_0, E_* — предэкспонент и энергия активации вязкости жидкого металла, и функции стесненности [10]

$$f(\varphi) = 1 + \frac{3}{1/\varphi - 1/0,52}. \quad (14)$$

Используя (13), из (10) получим

$$\frac{dv_2}{dz} = \frac{p + Z - p_L m}{2\eta(1 - m)}. \quad (15)$$

Интегралы уравнений неразрывности (1)–(3) имеют вид

$$(1 - m)\rho_2(u + v_2)(1 + \alpha\mu) = (1 - m_0)\rho_{см}u = \\ = (1 - m_{пр})\rho_{пр}(u + v_{2,r})(1 + \mu), \quad (16) \\ m\rho_1(u + v_1) = m_0\rho_0(u + v_{1,0}) + \\ + \frac{(1 - m_0)\rho_{см}u\alpha\mu}{1 + \alpha\mu} = m_{пр}\rho_{пр}(u + v_{1,r}) - \\ - \frac{(1 - m_{пр})\rho_{пр}u\mu(1 - \alpha)(u + v_{2,r})}{1 + \alpha\mu}, \quad (17)$$

где m_0 — начальная пористость, ρ_0 — плотность газа на холодном торце образца. Определяя из (16) скорость деформации dv_2/dz и подставляя ее в (15), получим уравнение

$$\frac{dm}{dz} = \frac{[\rho_{пр}(1 + \mu) - \rho_{см}]\rho_2(1 - m) d\alpha}{\rho_{см}\rho_{пр}(1 + \alpha\mu) dz} + \\ + \frac{(p + Z - p_L m)\rho_2(1 - m)(1 + \alpha\mu)}{2\eta(1 - m_0)u\rho_{см}}, \quad (18)$$

определяющее изменение пористости.

Так как ширина зоны горения и структурных превращений существенно меньше расстояний от нее до торцов образца (квазистационарность процесса), основное сопротивление фильтрации приходится на холодную смесь (см. рис. 1,а) или продукты синтеза (см. рис. 1,б). Поэтому давление во фронте p_* можно считать постоянным и в уравнении (18) полагать $p = p_*$.

Для систем с легкоплавким компонентом температура плавления является естественной «обрезкой» источника тепловыделения и структурных изменений. Анализ (18) для характерных значений величин ($\mu \approx 0,05$, $\rho_{см} \approx \rho_{пр} \approx 5 \cdot 10^3$ кг/м³, $\epsilon \approx 1$ Н/м, $R_0 \approx 10^{-4}$ м, $p_0 \approx 10^6$ Па, $u \approx 10^{-2}$ м/с) показывает, что в системе с легкоплавким компонентом, когда $\eta_*(T_m) \approx 10^{-3}$ Па·с, второе слагаемое при $T = T_m$ на несколько порядков больше первого. Таким образом, как и в других подобных случаях [11], нахождение пористости можно провести в два этапа.

На первом этапе, когда устанавливается примерное равновесие между усилием прессования, жидкофазным спеканием и разрыхляющим действием газа, пористость, отвечающая этому состоянию $m_{пр,0}$, определяется следующим из (18) равенством

$$p_* + Z - p_L m_{пр,0} = 0. \quad (19)$$

На втором этапе в случае потери текучести суспензии, связанной с возрастанием доли твердой фазы до критического значения (см. (14)), изменение пористости определяется только изменением объема конденсированной фазы при химическом реагировании. Текущая и конечная пористости определяются выражениями

$$m = 1 - \frac{(1 - m_{\text{пр},0})}{1 + \alpha\mu} \left[1 + \frac{\alpha(\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{пр}})}{\rho_{\text{пр}}} \right], \quad (20)$$

$$m_{\text{пр}} = 1 - \frac{(1 - m_{\text{пр},0})\rho_{\text{см}}}{(1 + \mu)\rho_{\text{пр}}},$$

полученными после интегрирования (18) при $\eta = \infty$.

Если конечный продукт взаимодействия остается текучим, второе слагаемое в правой части (18) остается определяющим во время всего процесса. Физически это означает, что нарушение равновесия между сжимающими и разрыхляющими силами, вызванное объемными изменениями, успевает релаксировать.

Интегрируя уравнение фильтрации (5) и находя скорость горения для узкой зоны реакции из (4), (6), для рассматриваемого случая (см. рис. 1,а) имеем следующие соотношения, определяющие неизвестные величины p_* , u , $m_{\text{пр},0}$:

$$p_* - N - m^*p_0 - m_{\text{пр},0}pL \sim 0, \quad (21)$$

$$p_* \approx p_0 + \frac{150(1 - m_0)^3 \rho_c \mu \mu_1 h_2}{4m_0^3 R_*^2 (1 + \mu) \rho_0},$$

$$u^2 \approx \frac{\lambda_0 k(T_f) R T_f^2 (1 + \mu) (1 - m_{\text{пр},0})^2}{\rho_{\text{см}} (1 - m_0)^2 E K Q}, \quad (22)$$

$$K = \int_0^1 \frac{(1 - \alpha)}{F(\alpha) [1 + \alpha(\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{пр}})/\rho_{\text{пр}}]} d\alpha,$$

где T_f — температура горения, Q — тепловой эффект реакции, $R_* = R_A R_B [c_0 \rho_B + (1 - c_0) \rho_A] / [c_0 \rho_B R_B + (1 - c_0) \rho_A R_A]$ — эффективный размер смеси тугоплавкого (А) и легкоплавкого (В) порошков [12]; ρ_A, ρ_B — их плотности; c_0 — доля тугоплавкого компонента в смеси. Значение p_* получено в линейном приближении для мелких частиц ($R_* \leq 10^{-4}$ м), когда основное сопротивление фильтрации определяется ламинарной составляющей: $C \approx 200(1 - m)/m^2 \text{Re}$. Формулы (22) тождественны полученным в [11] при горении смесей с частично газообразным продуктом. Температура горения с использованием следующего из (16), (17) приближения

$$(u + v_{1,0}) \approx - \frac{(1 - m_0) u \rho_{\text{см}} \mu}{m_0 \rho_0 (1 + \mu)}$$

и с учетом независимости теплового эффекта от температуры задается выражением

$$T_f \approx T_0 + \frac{Q - (1 + \mu)(1 - c_0)L}{c_k(1 + \mu) - c_1 \mu}. \quad (23)$$

При разгрузке давления через смесь для схемы, изображенной на рис. 1,а, из соотношений (10), (11), (22) получим выражение для оценки нагрузки:

$$N = (1 - m^*)p_0 - \frac{3\epsilon m_{\text{пр},0}(1 - m_{\text{пр},0})^2}{R_0} + \frac{(1 - m_0)^2(1 - m_{\text{пр},0})h_2 K_1}{m_0^3 R_*^2}, \quad (24)$$

$$K_1 = \frac{150 \rho_{\text{см}} \mu \mu_1}{4 \rho_0} \sqrt{\frac{\lambda_0 R T_f^2 k(T_f)}{\rho_{\text{см}} E Q K}}.$$

Используя соотношение (20), для заданного значения $m_{\text{пр}}$ можно найти $m_{\text{пр},0}$ и из (24) вычислить N .

Для разгрузки давления через продукты для схемы, изображенной на рис. 1,б, проведя подобные выкладки, получим

$$N = p_0 - \frac{3\epsilon m_{\text{пр},0}(1 - m_{\text{пр},0})^2}{(1 - m^*)R_0} + \frac{(1 - m_{\text{пр}})^2(1 - m_{\text{пр},0})h_1 T_f K_1}{m_{\text{пр}}^3 (1 - m^*) R_c^2 T_0}. \quad (25)$$

Рассмотрим синтез в пресс-формах для схем, изображенных на рис. 2, когда волна химического и структурного превращения распространяется от дна пресс-формы к пуансону. Исследование таких встречных режимов удобно проводить в системе координат, движущейся со скоростью горения в направлении $+z$. Опуская промежуточные вычисления, запишем выражение для оценки усилия прессования при разгрузке давления через дно пресс-формы (см. рис. 2,а) и пуансон (см. рис. 2,б):

$$N = p_0(1 - m^*) - \frac{3\epsilon m_{\text{пр},0}(1 - m_{\text{пр},0})^2}{R_c} + \frac{(1 - m_{\text{пр}})^2(1 - m_{\text{пр},0})T_f h_2 K_1}{m_{\text{пр}}^3 (1 - m^*) R_c^2 T_0}, \quad (26)$$

$$N = p_0 - \frac{3\epsilon m_{\text{пр},0}(1 - m_{\text{пр},0})^2}{(1 - m^*)R_0} + \frac{(1 - m_0)^2(1 - m_{\text{пр},0})h_1 K_1}{m_0^3 R_*^2}. \quad (27)$$

Анализ формул (24)–(27) показывает, что для получения высокоплотного продукта наиболее выгодны процессы, протекающие по схемам, изображенным на рис. 1,а и 2,б. По схемам

рис. 1, б, 2, а, когда истечение газа происходит через продукты, получить беспористый материал невозможно.

Достижение в волне горения предельного значения $m_{\text{пр},0} \approx 0$ не всегда обеспечивает получение продукта максимальной плотности. Кроме нагрузки, определенной по формулам (24), (27), необходимо, как следует из второго соотношения (20), выполнение условия $(1 + \mu)\rho_{\text{пр}} \leq \rho_{\text{см}}$. Для систем «переходный металл IV (V) группы — углерод (бор)», являющихся базовыми при создании композиционных материалов [2], даже в случае чистых компонентов ($\mu = 0$) это условие не выполняется. В частности, $\rho_{\text{пр}} = 4,92 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{см}} = 3,76 \cdot 10^3$ кг/м³ для системы Ti — C и $\rho_{\text{пр}} = 4,45 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{см}} = 3,52 \cdot 10^3$ кг/м³ для системы Ti — 2В. Минимальная конечная пористость составляет соответственно 0,235 и 0,21.

Для практики важно получение композиционных материалов, состоящих из твердых включений (бориды, карбиды) и пластичной металлической (Ni, Fe, Cu и т. д.) матрицы. Если металл матрицы легкоплавкий, возможно получение беспористых композитов силовым СВС-компактированием в одной стадии при нагрузках, соответствующих (24), (27). Для этого необходимо сохранение текучести твердо-жидкой суспензии. Критическая объемная концентрация твердых включений, при которой теряется текучесть (см. (14)), составляет $\varphi_{\text{кр}} = 0,52$, что соответствует объемной концентрации одинаковых сфер при кубической укладке. По определению

$$\varphi_{\text{кр}} = \frac{M_{\text{пр}}/\rho_{\text{пр}}}{M_{\text{пр}}/\rho_{\text{пр}} + M_{\text{м}}/\rho_{\text{м}}}, \quad (28)$$

$M_{\text{пр}}$, $M_{\text{м}}$ — массы продукта и металлической связки, $\rho_{\text{м}}$ — плотность металла. Массовая концентрация связки в исходной смеси

$$c^* = \frac{M_{\text{м}}}{M_{\text{см}} + M_{\text{м}}}, \quad (29)$$

где $M_{\text{см}} = M_{\text{пр}}(1 + \mu)$ — масса реагирующей смеси. Из (28), (29) находим минимальное значение c^* , при котором сохраняется текучесть суспензии:

$$c^* = \frac{\rho_{\text{м}}(1 - \varphi_{\text{кр}})}{\rho_{\text{м}}(1 - \varphi_{\text{кр}}) + \varphi_{\text{кр}}\rho_{\text{пр}}(1 + \mu)}. \quad (30)$$

Для композиции TiC + Ni массовая концентрация никеля в исходной смеси должна превышать 60 %, а для TiC + Al $c^* = 35$ %. Приведенные примеры свидетельствуют о значительном

разбавлении исходной смеси легкоплавким металлом, что затрудняет или делает невозможным реализацию самоподдерживающегося режима синтеза без дополнительного нагрева.

В предельном случае, когда отсутствуют газообразные продукты ($\mu = 0$), изменение пористости определяется выражением

$$m = 1 - (1 - m_{\text{пр},0}) \left[1 + \frac{\alpha^* \rho_{\text{м}} (\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{пр}})}{\rho_{\text{пр}} \rho_{\text{см}} c^* + (1 - c^*) \rho_{\text{м}} \rho_{\text{пр}}} \right], \quad (31)$$

$\alpha^* = M_{\text{пр}} / (M_{\text{пр}} + M_{\text{м}} + M_{\text{см}})$ — глубина превращения, меняющаяся от 0 до $1 - c^*$. Выражение

$$m_{\text{пр}} = \frac{(1 - c^*) \rho_{\text{м}} (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{см}})}{\rho_{\text{пр}} [\rho_{\text{см}} c^* + (1 - c^*) \rho_{\text{м}}]} \quad (32)$$

определяет минимальное возможное значение конечной пористости при заданном содержании легкоплавкой металлической связки. Например, $m_{\text{пр}} = 0,21$ для продукта $0,8\text{TiC} + 0,2\text{Ni}$ и $m_{\text{пр}} = 0,16$ для $0,8\text{TiB}_2 + 0,2\text{Al}$.

Таким образом, приложение усилий, определенных формулами (24)–(27), к горячей шихте с низким содержанием жидкой фазы не обеспечивает максимальной плотности продуктов. В то же время такие нагрузки при одностадийном СВС-компактировании позволяют получать малопористые материалы. Оценки необходимых усилий и конечной пористости определены формулами (20), (23)–(27), (30)–(32).

Получить высокоплотные материалы в системах с малым содержанием жидкой фазы возможно при нагрузках, способных деформировать горячие твердые продукты. Анализ таких режимов проводится с помощью уравнения (18) без учета давления газа в порах ($p = 0$) и лапласового давления ($p_L = 0$) [7] или на моделях, основанных на механике вязкой сжимаемой жидкости [13, 14]. Оба подхода дают одинаковые результаты [7]. При этом следует иметь в виду, что вязкость кристаллических тел зависит от структуры вещества и является функцией напряжений. Поэтому для корректного описания процесса необходимо решение взаимосвязанной задачи с применением какой-либо модели для расчета вязкости [15] или использование полученных в специальных исследованиях [16, 17] зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: двадцать лет поисков и находок. Черноголовка, 1989. (Препр. / ИСМ РАН; № 92).

2. Левашов Е. А., Богатов Ю. В., Рогачев А. С. и др. Закономерности формирования структуры синтетических твердых инструментальных материалов в процессе СВС-компактирования // Инж.-физ. журн. 1992. Т. 63, № 5. С. 558–576.
3. Щербаков В. А., Грядунов А. Н., Штейнберг А. С. Макрокинетика процесса СВС-компактирования // Инж.-физ. журн. 1992. Т. 63, № 5. С. 583–592.
4. Sata N., Ikeuchi J. Simultaneous synthesis and forming of Ti-B system by self-propagating reaction // J. Ceram. Soc. JPN. 1987. V. 95, N 2. P. 243.
5. Голубев В. А., Проскудин В. Ф., Березко П. Г. и др. О влиянии усадки шлаков поджигающей таблетки на параметры зажигания // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 5. С. 42–44.
6. Найбороденко Ю. С., Касацкий Н. Г. и др. Влияние термической обработки в вакууме на горение безгазовых систем // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черноголовка, 1980. С. 74–77.
7. Смоляков В. К. О моделировании высокотемпературного синтеза в пресс-формах // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 49–54.
8. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания. Киев: Наук. думка, 1972.
9. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1.
10. Хашпель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976.
11. Смоляков В. К. Изменением пористости при горении гетерогенных систем с частично газообразным продуктом // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 13–21.
12. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: ИТФ, 1984.
13. Бучацкий Л. М., Худяев С. И., Шкадинская Г. В. Распространение фронта горения и уплотнение в порошковом материале в условиях прессования // Химическая физика горения и взрыва. Проблемы горения и взрыва: Материалы IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка, 1989. С. 15–18.
14. Смоляков В. К. К теории горения безгазовых систем в условиях действия постоянной нагрузки // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 69–74.
15. Смоляков В. К. О макроструктурных изменениях при горении безгазовых смесей в пресс-формах // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 2. С. 73–79.
16. Бучацкий Л. М., Столин А. М. Высокотемпературная реология СВС-материалов // Инж.-физ. журн. 1992. Т. 63, № 5. С. 593–604.
17. Бучацкий Л. М. Особенности уплотнения вязкопластической среды с переменным пределом текучести // Инж.-физ. журн. 1992. Т. 63, № 5. С. 605–611.

*Поступила в редакцию 31/III 1997 г.,
в окончательном варианте — 15/VIII 1997 г.*