

ВЛИЯНИЕ ПОДОГРЕВА НА СТРУКТУРУ И ПРЕДЕЛЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ В ДВУХСЛОЙНЫХ ОБРАЗЦАХ

Б. С. Сеплярский, Т. П. Ивлева, Е. А. Левашов*

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка
* Исследовательский центр СВС Института стали и сплавов, 117936 Москва

С помощью методов математического моделирования исследована тепловая и концентрационная структура фронта горения в двухслойных образцах. Определены пределы горения по теплотерям при различных тепловых эффектах и теплофизических характеристиках слоев. Показано, что повышение температуры среды, в которую помещен образец, является эффективным способом управления процессом горения. Установлено, что для значений определяющих параметров, используемых в расчетах, повышение температуры на один характерный интервал $T_{env,1} = T_{in} + RT_{b,1}^2/E$ (T_{in} — начальная температура образца, $T_{b,1}$ — температура горения неразбавленного слоя) увеличивает критическое значение коэффициента теплотер более чем в двадцать раз.

В работе [1] предложен способ получения методом СВС новых алмазосодержащих материалов и изделий. Суть метода состоит в введении алмаза в реакционную смесь, состоящую из реагентов, которые могут взаимодействовать в режиме горения (например, Ti—B, Ni—Al, Ti—C—Ni, Ti—Mo—C и др.). Проведенные экспериментальные исследования показали, что алмазное зерно в определенных условиях выдерживает без существенных изменений своих свойств воздействие высоких температур, развиваемых в волне синтеза. Оказалось, что объемное разупрочнение алмаза в условиях СВС-процесса в большей степени зависит от времени его пребывания в высокотемпературной зоне, чем от температуры в зоне реакции.

Дальнейшим развитием данного направления исследований явилось создание с помощью метода СВС функциональных градиентных алмазосодержащих материалов (ФГАМ) [2]. В этом случае используется двухслойный вариант проведения СВС-процесса с введением алмаза в реакционную смесь одного слоя (рис. 1). Ожидалось, что данный прием позволит решить сразу три технологические задачи:

- 1) уменьшить время пребывания алмаза в высокотемпературной зоне волны горения;
- 2) повысить предельную концентрацию алмаза в рабочем слое, так как после инициирования реакции горения слой без алмаза играет роль химической печи, прогреваю-

щей экзотермическую алмазосодержащую смесь;

- 3) существенно снизить расход дорогостоящего алмазного порошка при получении крупногабаритных заготовок.

В данной работе численно исследовали форму и тепловую и концентрационную структуру фронта горения в двухслойных системах, а также определяли пределы горения по теплотерям при различных тепловых эффектах и теплофизических характеристиках алмазосодержащего слоя. Предложен новый прием, расширяющий возможности СВС-метода получения ФГАМ. Суть этого приема состоит в использовании предварительно нагретой инертной засыпки, окружающей исходную заготовку.

Рассматривается следующая модель процесса (рис. 1). На торце плоской реакционно-

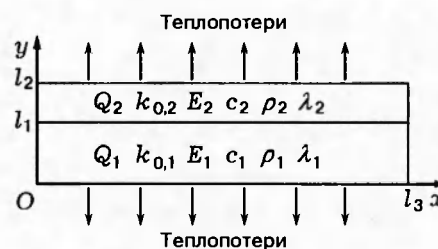


Рис. 1. Модель процесса

способной заготовки, состоящей из двух слоев, находящихся в идеальном контакте друг с другом, в течение времени $0 < t < t_{ig}$ задается температура T_{ig} , превышающая начальную температуру образца T_{in} . В результате нагрева образца в нем инициируется волна горения, которая распространяется вдоль оси Ox . Считается, что в общем случае теплофизические свойства слоев различны и каждый из них характеризуется набором кинетических констант и тепловых эффектов. Теплообмен образца с окружающей средой происходит по закону Ньютона и определяется коэффициентом теплоотдачи α (в общем случае значение α различно для каждого из слоев). Полагается, что ширина образца много больше его толщины, что позволяет ограничиться рассмотрением двумерных температурного и концентрационного полей.

Система уравнений, описывающая такой процесс, имеет следующий вид:

$$0 < y < l_1 :$$

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + Q_1 k_{0,1} \exp \left(- \frac{E_1}{RT_1} \right) (1 - \eta_1),$$

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial t} = k_{0,1} (1 - \eta_1) \exp \left(- \frac{E_1}{RT_1} \right);$$

$$l_1 < y < l_2 :$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right) + Q_2 k_{0,2} \exp \left(- \frac{E_2}{RT_2} \right) (1 - \eta_2),$$

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} = k_{0,2} (1 - \eta_2) \exp \left(- \frac{E_2}{RT_2} \right).$$

Начальные условия:

$$t = 0, 0 \leq x \leq l_3, 0 \leq y \leq l_2 : T_1 = T_2 = T_{in}, \eta_1 = \eta_2 = 0.$$

Граничные условия:

$$x = 0, 0 \leq y \leq l_2 :$$

$$0 < t < t_{ig} : T_1 = T_2 = T_{ig},$$

$$t \geq t_{ig} : \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0;$$

$$0 \leq x \leq l_3, y = 0 : \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \alpha_1 (T_1 - T_{env,1});$$

$$0 \leq x \leq l_3, y = l_2 : \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\alpha_2 (T_2 - T_{env,2});$$

$$x = l_3, 0 \leq y \leq l_2 : \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0;$$

$$0 \leq x \leq l_3, y = l_1 : \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, T_1 = T_2.$$

Здесь T_i — температура; x, y — пространственные координаты; t — время; η_i — степень превращения исходной смеси в продукт реакции; λ_i — эффективный коэффициент теплопроводности; c_i, ρ_i — теплоемкость и плотность конденсированного вещества; $E_i, k_{0,i}$ — энергия активации и предэкспоненциальный множитель реакции; R — универсальная газовая постоянная; Q_i — тепловой эффект реакции на единицу массы конденсированной смеси; T_{in} — начальная температура вещества; T_{ig} — температура воспламенителя; t_{ig} — время действия воспламенителя; l_1, l_2 — толщины неразбавленного слоя и всего образца; l_3 — длина образца; $T_{env,i}$ — температура окружающей образец среды; α_i — коэффициент теплоотдачи в законе Ньютона; индексы относятся: 1 — к неразбавленному слою, 2 — к слою, содержащему алмазный порошок.

При записи системы полагали, что теплофизические свойства каждого слоя постоянны и не меняются в процессе горения, алмазные зерна являются инертным разбавителем и не участвуют в синтезе. Это означает, что кинетические характеристики реакции первого и второго слоев совпадают: $E_1 = E_2, k_{0,1} = k_{0,2}$.

Для удобства анализа и уменьшения числа независимых переменных систему уравнений приводили к безразмерному виду. При обезразмеривании использованы обычные в теории горения масштабы:

$$0 < \zeta < L_1 :$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \zeta^2} + (1 - \eta_1) \exp \frac{\theta_1}{1 + \beta \theta_1},$$

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial \tau} = \gamma (1 - \eta_1) \exp \frac{\theta_1}{1 + \beta \theta_1};$$

$$L_1 < \zeta < L_2 :$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = c_a \left(\frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \zeta^2} \right) +$$

$$+ c_k c_Q c_c (1 - \eta_2) \exp \frac{c_E \theta_2}{1 + \beta \theta_2},$$

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial \tau} = c_k \gamma (1 - \eta_2) \exp \frac{c_E \theta_2}{1 + \beta \theta_2}.$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \tau = 0, 0 \leq \xi \leq L_3, 0 \leq \zeta \leq L_2: \\ \theta_1 = \theta_2 = -\theta_{in}, \eta_1 = \eta_2 = 0; \\ \xi = 0, 0 \leq \zeta \leq L_2, 0 < \tau < \tau_{ig}: \theta_1 = \theta_2 = 0; \\ \tau \geq \tau_{ig}: \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} = c_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} = 0; \\ 0 < \xi \leq L_3, \zeta = 0: \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = z_1(\theta_1 + \theta_{env,1}); \\ 0 < \xi \leq L_3, \zeta = L_2: \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = -z_2(\theta_2 + \theta_{env,2}); \\ \xi = L_3, 0 \leq \zeta \leq L_2: \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} = c_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} = 0; \\ 0 < \xi \leq L_3, \zeta = L_1: \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = c_\lambda \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta}, \theta_1 = \theta_2. \end{aligned}$$

Безразмерные переменные и параметры:

$$\begin{aligned} \theta_i = \frac{E_1}{RT_{b,1}^2}(T_i - T_{b,1}), \quad T_{b,1} = T_{in} + \frac{Q_1}{c_1 \rho_1}, \\ \tau = \frac{t}{t_*}, \quad t_* = \frac{c_1 \rho_1 RT_{b,1}^2}{Q_1 E_1 k_{0,1}} \exp \frac{E_1}{RT_{b,1}}, \\ \xi = \frac{x}{x_*}, \quad \zeta = \frac{y}{x_*}, \quad x_* = \sqrt{a_1 t_*}, \quad a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1}, \\ \beta = \frac{RT_{b,1}}{E_1}, \quad \gamma = \frac{c_1 \rho_1 RT_{b,1}^2}{E_1 Q_1}, \\ L_1 = \frac{l_1}{x_*}, \quad L_2 = \frac{l_2}{x_*}, \quad L_3 = \frac{l_3}{x_*}, \\ c_a = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2} \frac{c_1 \rho_1}{\lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} c_c, \quad c_c = \frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2}, \\ c_Q = \frac{Q_2}{Q_1}, \quad c_E = \frac{E_2}{E_1}, \quad c_k = \frac{k_{0,2}}{k_{0,1}} \exp \frac{E_1 - E_2}{RT_{b,1}}, \\ c_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad \theta_{env,i} = \frac{E_1}{RT_{b,1}^2}(T_{b,1} - T_{env,i}), \\ \theta_{in} = \frac{E_1}{RT_{b,1}^2}(T_{b,1} - T_{in}), \quad \tau_{ig} = \frac{t_{ig}}{t_*}, \\ z_1 = \frac{\alpha_1 x_*}{\lambda_1}, \quad z_2 = \frac{\alpha_2 x_*}{\lambda_2}. \end{aligned}$$

Здесь $\theta_i, \xi, \zeta, \tau$ — безразмерные температура, координаты и время; β, γ — малые параметры теории горения; θ_{in} — безразмерная начальная температура вещества; z_1, z_2 — безразмерные коэффициенты теплоотдачи; L_1, L_2 — безразмерные толщины неразбавленного слоя и образца; L_3 — безразмерная длина образца; c_Q — отношение тепловых эффектов разбавленного и неразбавленного слоев; $\theta_{env,1}, \theta_{env,2}$ —

безразмерные температуры окружающей среды; c_a, c_λ, c_c — отношение коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости второго и первого слоев; c_E — отношение энергий активации реакций в алмазосодержащем и неразбавленном слоях; c_k — отношение скоростей реакций при масштабной температуре $T_{b,1}$ и глубине превращения $\eta_1 = \eta_2 = 0$; τ_{ig} — время действия теплового импульса.

При численном анализе задач такого типа, содержащих значительное количество безразмерных переменных, принципиальное значение имеет выбор ограниченного числа параметров, которые изменяются в процессе расчета, а также численные значения других параметров. Основываясь на результатах экспериментальных исследований, в качестве варьируемых параметров выбирали отношение c_Q , которое характеризует степень разбавления шихты алмазным порошком, а также отношения c_a и c_λ . Выбор c_a и c_λ в качестве варьируемых параметров не случаен, а основан на том факте, что коэффициент теплопроводности алмаза равен $1200 \div 2000$ Вт/(м·К) [3] и много больше коэффициентов теплопроводности других компонентов шихты, используемых при синтезе ФАГМ. Эксперименты показали [2], что оптимальное соотношение между массами второго и первого слоев $m_2/m_1 \approx 0,3 \div 0,6$, поэтому в численных расчетах отношение $(L_2 - L_1)/L_1$, которое в рамках данной модели характеризует отношение m_2/m_1 , принимали равным 0,5. Для выбора значения L_2 использованы данные о протяженности зоны реакции, полученные в опытах по остановке фронта горения путем закалки в медном клине [4]. Эти опыты показали, что ширина зоны реакции $l_r \approx 100$ мкм. Тогда размеры зоны прогрева l_h можно оценить по формуле

$$l_h = l_r / \gamma.$$

Исходя из нее $l_h \approx 0,5 \div 1$ мм. Поэтому в основной серии расчетов безразмерную толщину образца L_2 принимали равной 12 прогретым слоям, что соответствует размерной толщине образца $6 \div 12$ мм. Заготовки такой толщины и используются в экспериментах по изучению механизма синтеза ФАГМ. Значение параметров γ и β выбирали так, чтобы распространение фронта реакции носило стационарный характер. В соответствии с [5] этим требованиям отвечает следующая связь: $9,1\gamma - 2,5\beta > 1$.

Поскольку количественные данные о кинетике реакции горения, а также о теплофизических свойствах смесей, используемых при синтезе ФГАМ, отсутствуют, исследование закономерностей горения составных образцов носит качественный характер. Это означает, что необходимо найти такие внешние воздействия, которые приведут к качественному изменению характера горения и будут способствовать решению задачи получения ФГАМ с повышенным содержанием алмаза. Авторам статьи удалось найти такое внешнее воздействие — помещение исходного образца в подогретую среду ($T_{env,1} > T_{in}$, $T_{env,2} > T_{in}$).

Для объяснения высокой эффективности этого приема рассмотрим структуру фронта в двухслойном образце. В случае, когда второй слой содержит значительное количество алмазного порошка, скорость фронта в нем (u_2) значительно меньше скорости горения в первом слое (u_1). При этом поток тепла от горячих продуктов слоя, не содержащего алмазного наполнителя, инициирует реакцию горения в алмазо-содержащем слое. Фронт превращения вытянут вдоль границы раздела смесей, что позволяет рассматривать его как одномерный с направлением движения от границы $\zeta = L_1$ к внешней границе образца $\zeta = L_2$. Скорость поперечного фронта $v_2(\zeta)$ определяется потоком тепла от горячего первого слоя. По мере удаления зоны реакции от границы контакта слоев поток тепла, а вместе с ним и температура в зоне превращения уменьшаются. В силу экспоненциальной зависимости скорости фронта от температуры в зоне горения скорость быстро уменьшается. При этом размер зоны прогрева $l_h = a_2/v_2(\zeta)$ возрастает. Здесь $a_2 = \lambda_2/c_2\rho_2$ — коэффициент температуропроводности второго слоя. Когда l_h становится больше длины несгоревшей части слоя, возникают дополнительные потери тепла в окружающую среду, что еще больше замедляет распространение фронта. Если потери тепла больше потока тепла из зоны реакции, происходит остановка фронта и образуется недогоревший слой смеси. Следовательно, наиболее чувствительными к воздействию теплопотерь являются внешние слои образца.

Совсем по-другому происходит распространение поперечного фронта при подогреве образца от внешнего источника. По мере удаления фронта от границы раздела он попадает в область, нагреваемую от окружающей среды, что равносильно повышению начальной

температуры $T_{in}(y)$, а вместе с ней и температуры горения $T_{b,2}(y)$:

$$T_{b,2}(y) = T_{in}(y) + \frac{Q_2}{c_2\rho_2}.$$

Чем дальше продвигается фронт от границы $\zeta = L_1$ к границе $\zeta = L_2$, тем больше температура $T_{in}(y)$, что компенсирует уменьшение потока тепла от первого, горячего слоя. С увеличением $T_{b,2}(y)$ резко уменьшается толщина недогоревшего слоя. Высокая эффективность такого способа уменьшения недогорания в поверхностных слоях вещества впервые показана в работе [6]. Так, при температуре окружающей среды, превышающей начальную температуру смеси всего на один характерный температурный интервал $T_{env,1} = T_{in} + RT_{b,1}^2/E$, недогорание уменьшалось в 2–3 раза. В численных экспериментах ограничивались повышением $T_{env,i}$ на один характерный интервал, что соответствует разнице $T_{env,i} - T_{in} \approx 300 \div 500$ °С. Такой нагрев засыпки, окружающей заготовку, легко осуществим на практике и не приводит к воспламенению шихты, используемой в экспериментах по получению ФГАМ, а также к заметному ее превращению.

Для численного исследования процесса горения использовали программу, в которой исходная система дифференциальных уравнений записана с помощью конечных разностей. Решение искали по неявной разностной схеме с применением двумерной неравномерной расчетной сетки с переменным числом узлов, адаптирующейся к изменяющейся со временем структуре фронта. В результате численного решения определяли положение фронта в различные моменты времени. Считали, что местонахождению фронта горения (области интенсивного тепловыделения) соответствует линия уровня с половинной глубиной превращения. В процессе численного эксперимента вели наблюдение за изменением распределения температуры и глубины превращения вдоль оси $O\xi$ для характерных продольных сечений $\zeta = 0$, $\zeta = L_1$, $\zeta = L_2$. Для этих же сечений определяли зависимость от времени мгновенных скоростей движения фронта ω_i вдоль оси $O\xi$: $\omega_i = d\xi_i/d\tau$, где ξ_i — координата точки с глубиной превращения $\eta = 0,5$ в выбранном продольном сечении. В дальнейшем будем считать, что индекс 1 относится к $\zeta = 0$, 2 — к $\zeta = L_1$, 3 — к $\zeta = L_2$.

Для того чтобы понять, как происходит взаимодействие тепловых полей в каждом из

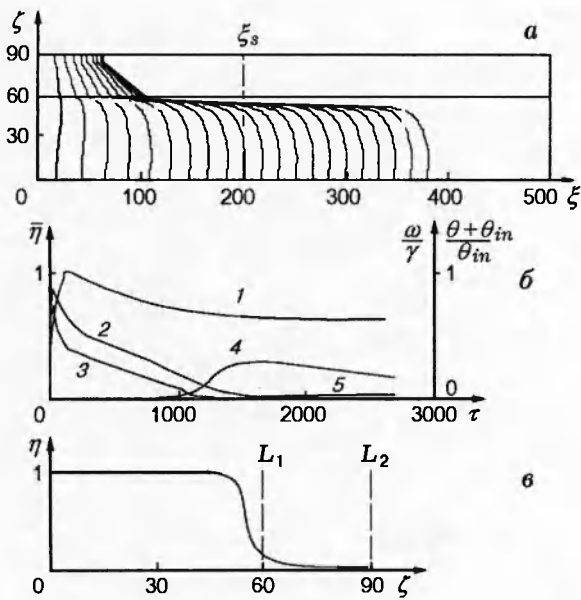


Рис. 2. Форма фронта горения в составном образце без подогрева, $\Delta\tau = 125$ (а); изменение в различные моменты времени мгновенной скорости фронта в направлении $\vec{O}\xi$ в различных сечениях образца, а также интегральной глубины превращения и максимальной температуры в зоне превращения второго слоя (б); распределения глубины превращения в поперечном сечении образца после прохождения фронта горения (в):

б: 1 — ω_1 , 2 — ω_2 , 3 — ω_3 , 4 — $\theta_{\max,2}$, 5 — η ; в: $L_1 = 60$, $L_2 = 90$, $L_3 = 500$, $c_Q = 0,7$, $c_a = c_\lambda = 5$, $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 5$, $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,14$, $\theta_{in} = 5$, $z_1 = z_2 = 0,019 \approx z_{cr}$

слоев, а также получить количественную информацию о процессе превращения в алмазосодержащем слое, изучали распределение температуры, глубины превращения и скорости реакции в заранее выбранном поперечном сечении образца. Координату сечения ξ_s выбирали на таком расстоянии от места инициирования, чтобы не сказывалось влияние начальных условий. Динамику изменения глубины превращения во втором слое при $\xi = \xi_s$ характеризовали с помощью средней по сечению глубины превращения

$$\eta = I_\eta(\tau)/I_{\eta,\max},$$

где

$$I_\eta(\tau) = \int_{L_1}^{L_2} \eta_2(\zeta) d\zeta,$$

$$I_{\eta,\max} = I_\eta|_{\eta=1} = L_2 - L_1.$$

Для анализа изменения температуры зоны реакции по мере удаления фронта горения

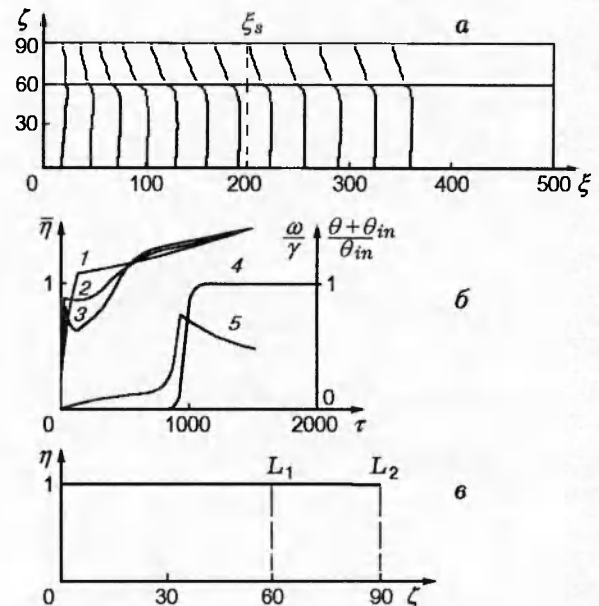


Рис. 3. Форма фронта горения в составном образце, помещенном в среду, нагретую на один характерный температурный интервал (а); изменение в различные моменты времени мгновенной скорости фронта в направлении $O\xi$ в различных сечениях образца, а также интегральной глубины превращения и максимальной температуры в зоне превращения второго слоя (б); распределения глубины превращения в поперечном сечении образца после прохождения фронта горения (в):

а: $\Delta\tau = 125$; б: 1 — ω_1 , 2 — ω_2 , 3 — ω_3 , 4 — η , 5 — $\theta_{\max,2}$; в: $L_1 = 60$, $L_2 = 90$, $L_3 = 500$, $c_a = c_\lambda = 5$, $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4$, $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,14$

от границы раздела проследим за изменением во времени температуры $\theta_{\max}(\tau)$ в точке максимума скорости тепловыделения.

На рис. 2 показаны структура фронта горения, а также изменение во времени величин $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \eta(\tau), \theta_{\max}(\tau)$ по обычному варианту проведения синтеза: $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = -\theta_{in}$. Значения $c_a = c_\lambda = 5$ и $c_Q = 0,7$ соответствуют значительному ($\approx 30\%$) разбавлению второго слоя алмазным наполнителем, что является причиной разницы теплофизических характеристик первого и второго слоев. При данных значениях параметров коэффициент тепловой активности второго слоя $\epsilon_2 = \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}$ намного больше коэффициента тепловой активности первого слоя $\epsilon_1 = \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}$: $k_\epsilon = \epsilon_2/\epsilon_1 = c_\lambda/\sqrt{c_a} \approx 2,24$.

Как видно из рис. 2, после инициирования волна горения в алмазосодержащем слое затухает ($\omega_3, \omega_2 \rightarrow 0$, $\eta|_{\xi_s=200} \approx 0,022$), сгорает только неразбавленный слой, причем из-за высокой тепловой активности второго слоя на гра-

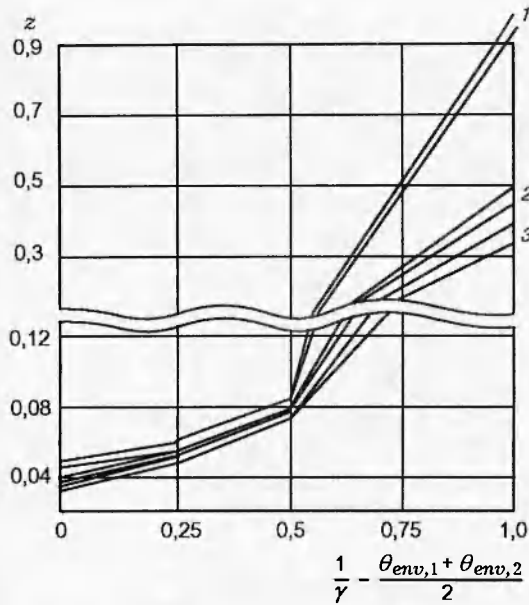


Рис. 4. Влияние температуры окружающей среды на пределы горения образца:

$L_1 = 40, L_2 = 60, L_3 = 500, c_Q = 0,7, \gamma = 0,2, \beta = 0,14;$
 $c_a = c_\lambda = 1,5$ (1), $2,0$ (2), $2,5$ (3)

нице слоев остается несгоревшая область. Скорость распространения фронта в два раза меньше адиабатической скорости горения первого слоя $\omega_{ad,1} \approx \gamma$.

На рис. 3 показаны результаты расчетов параметров горения при тех же значениях коэффициента теплообмена для того же самого образца, помещенного в нагретую среду: $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = \theta_{in} - 1$. Видно, что характер горения изменился кардинальным образом. По образцу вдоль оси $O\xi$ распространяется единый фронт превращения. В том же самом поперечном сечении ξ_c средняя глубина превращения, с некоторым запаздыванием по отношению к первому слою, стремится к максимально возможной ($\eta = 1$).

Скорость фронта по мере проникновения волны прогрева в глубь образца непрерывно возрастает и, несмотря на наличие теплопотерь, превышает значение $\omega_{ad,1}$. Анализируя картину синтеза, можно констатировать, что такой достаточно простой технологический прием воздействия на процесс горения действительно позволяет решать основные задачи, сформулированные в [2]:

- 1) уменьшить время пребывания алмаза в волне горения за счет увеличения скорости горения образца, что способствует повышению сохранности алмаза;

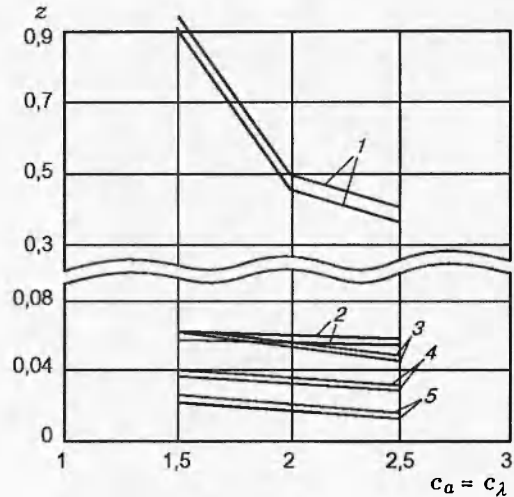


Рис. 5. Зависимость пределов горения составного образца от теплофизических свойств второго слоя:

$L_1 = 40, L_2 = 60, L_3 = 500, c_Q = 0,7, \gamma = 0,2, \beta = 0,14;$
 1 — $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4$, 2 — $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4,5$, 3 — $\theta_{env,1} = 5, \theta_{env,2} = 4$, 4 — $\theta_{env,1} = 5, \theta_{env,2} = 4,5$, 5 — $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 5$

- 2) повысить концентрацию алмаза в смеси, при которой еще возможен процесс получения изделий (по расчетам — в несколько раз).

Детальное численное исследование процесса горения проводили на образце, имеющем следующие характеристики: $L_1 = 40, L_2 = 60, L_3 = 500, \gamma = 0,2, \beta = 0,14, c_k = 1, c_c = 1, c_E = 1, \theta_{in} = 5, \theta_{ig} = 0$. Из физических соображений ясно, что увеличение содержания алмаза в шихте приводит к уменьшению теплового эффекта на 1 г смеси, а также к повышению теплопроводности второго слоя из-за высокого значения коэффициента теплопроводности алмаза, поэтому основными параметрами были c_Q, c_a, c_λ . Так как положительный технологический эффект обеспечивался подогревом окружающей образец среды, то варьировались также параметры $\theta_{env,1}, \theta_{env,2}$, характеризующие величину подогрева. В результате расчетов определено предельное значение коэффициентов теплопотерь $z_{cr,1}, z_{cr,2}$, при которых еще возможно горение. При $z_1 > z_{cr,1}, z_2 > z_{cr,2}$ процесс горения после стадии инициирования затухает. Для получения качественных изделий мало обеспечить сгорание неразбавленного слоя, надо добиться высокой глубины превращения в алмазосодержащем слое. Поэтому в расчетах

Таблица 1
Зависимость величины критических теплотерь от температуры окружающей среды
($c_a = c_\lambda = 2, L_1 = 40, L_2 = 60, L_3 = 500, \gamma = 0,2, \beta = 0,14$)

c_Q	$z_{cr} \left(\begin{array}{l} z < z_{cr} \\ z > z_{cr} \end{array} \right)$				
	$-\theta_{env,1} = -5,0$ $-\theta_{env,2} = -5,0$	$-\theta_{env,1} = -5,0$ $-\theta_{env,2} = -4,5$	$-\theta_{env,1} = -5,0$ $-\theta_{env,2} = -4,0$	$-\theta_{env,1} = -4,5$ $-\theta_{env,2} = -4,5$	$-\theta_{env,1} = -4,0$ $-\theta_{env,2} = -4,0$
0,5	0,015	0,027	0,048	0,045	0,35
	0,016	0,028	0,049	0,0475	0,375
0,7	0,018	0,033	0,057	0,053	0,45
	0,02	0,034	0,058	0,054	0,5
0,8	0,02	0,0375	0,0625	0,055	0,55
	0,0225	0,04	0,065	0,06	0,757
0,9	—	—	—	—	0,71
	—	—	—	—	0,72
1,0	0,03	0,045	0,076	0,065	0,95
	0,033	0,05	0,08	0,07	0,975

Примечание. При $z_{cr} < 0,1 \bar{\eta}(z_{cr}) \approx 1$. При $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4 \bar{\eta}(z_{cr}) \approx 0,6$, при $z < 0,25z_{cr} \bar{\eta} > 0,9$. При $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4$ значение z_{cr} возрастает в несколько раз. В таблице приведены наибольшие расчетные значения z , при которых еще возможно распространение фронта горения ($z < z_{cr}$), и наименьшие значения z , при которых происходило затухание фронта химического превращения ($z > z_{cr}$).

Таблица 2
Зависимость критического значения коэффициента теплотерь от температуры окружающей среды при различных значениях c_a и c_λ
($L_1 = 40, L_2 = 60, c_Q = 0,7, \gamma = 0,2, \beta = 0,14$)

$c_a - c_\lambda$	$z_{cr} \left(\begin{array}{l} z < z_{cr} \\ z > z_{cr} \end{array} \right)$				
	$-\theta_{env,1} = -5,0$ $-\theta_{env,2} = -5,0$	$-\theta_{env,1} = -5,0$ $-\theta_{env,2} = -4,5$	$-\theta_{env,1} = -5,0$ $-\theta_{env,2} = -4,0$	$-\theta_{env,1} = -4,5$ $-\theta_{env,2} = -4,5$	$-\theta_{env,1} = -4,0$ $-\theta_{env,2} = -4,0$
1,5	0,023	0,037	0,057	0,06	0,93
	0,025	0,04	0,061	0,062	0,95
2,0	0,018	0,033	0,057	0,053	0,45
	0,02	0,034	0,058	0,054	0,5
2,5	0,015	0,03	0,055	0,045	0,35
	0,0175	0,0325	0,0575	0,0475	0,4

следили за интегральной глубиной превращения в выбранном сечении ξ_s . Результаты расчетов сведены в табл. 1, 2, а также показаны на рис. 4-6, где верхняя кривая каждой пары соответствует значениям $z < z_{cr}$, нижняя — $z > z_{cr}$. Как видно из рисунков, резкое изменение значений $z_{cr,1} = z_{cr,2} = z_{cr}$ происходит при $-\theta_{env,1} + \theta_{in} = -\theta_{env,2} + \theta_{in} = 1$. Для того чтобы было заметно изменение z_{cr} при относительно небольшом подогреве $-\theta_{env,i} + \theta_{in} \leq 0,5$, для z_{cr} , соответствующих данному интервалу измене-

ния $\theta_{env,i}$, использована шкала большего масштаба. Как и предполагалось, из всех изменяемых параметров наиболее значительное влияние на процесс горения оказывает температура окружающей среды. Так, увеличение $\theta_{env,i}$ на один характерный температурный интервал позволило увеличить z_{cr} более чем в двадцать раз для всех значений c_Q, c_a, c_λ , используемых в расчетах. Изменение c_Q от 1 до 0,5, что примерно соответствует разбавлению исходной смеси алмазом на 50 %, привело к уменьшению z_{cr}

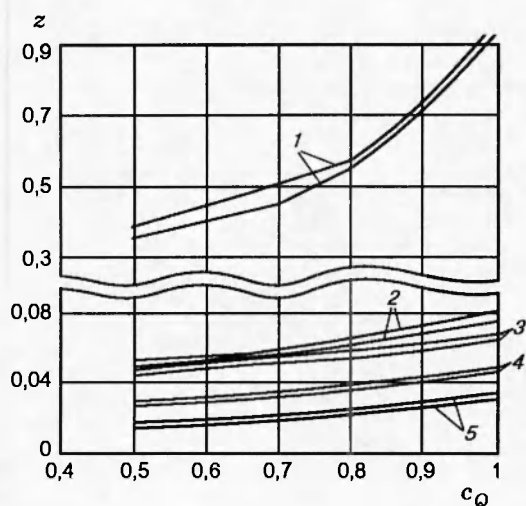


Рис. 6. Влияние разбавления на пределы горения составного образца:

$L_1 = 40, L_2 = 60, L_3 = 500, \gamma = 0,2, \beta = 0,14, c_a - c_\lambda = 2;$
 1 - $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4$, 2 - $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 4,5$, 3 -
 $\theta_{env,1} = 5, \theta_{env,2} = 4$, 4 - $\theta_{env,1} = 5, \theta_{env,2} = 4,5$, 5 -
 $\theta_{env,1} = \theta_{env,2} = 5$

всего в 2,5 раза при фиксированном значении остальных параметров. Увеличение c_a, c_λ от 1,5 до 2,5 также дает снижение z_{cr} всего в два раза при нагреве окружающей среды на один характерный интервал.

ВЫВОДЫ

1. Численно исследована тепловая и концентрационная структура фронта горения в двухслойном образце.

2. Определены пределы горения составного образца при различном значении тепловых эффектов и теплофизических характеристик слоев.

3. Предложено управлять процессом горения с помощью помещения образца в нагретую среду.

4. Показана высокая эффективность такого способа воздействия на процесс горения и глубину превращения в разбавленном слое уже при повышении температуры всего на один характерный температурный интервал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Падюков К. Л., Левашов Е. А., Боровинская И. П., Кост А. Г. Закономерности поведения синтетического алмаза в волне горения СВС // Инж.-физ. журн. 1992. Т. 63, № 5. С. 577-583.
2. Левашов Е. А., Вьюшков Б. В., Штанская Е. В., Боровинская И. П. Особенности формирования структуры и свойств алмазосодержащих функциональных градиентных материалов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1996. № 1. С. 52-59.
3. Физические свойства алмаза: Справочник / Н. В. Новиков, Ю. А. Кочержинский и др. Киев: Наук. думка, 1987.
4. Мержанов А. Г., Рогачев А. С., Мукасьян А. С., Хусид Б. М. Макрокинетика структурных превращений при безгазовом горении смесей порошков титана и углерода // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 1. С. 104-114.
5. Шкадинский К. Г., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 1. С. 19-28.
6. Seplyarskii V. S., Grachev V. V., Maklakov S. V., and Borovinskaya I. P. Self-propagating high-temperature synthesis in preliminary developed temperature fields // Intern. J. SHS. 1993. V. 2, N 1. P. 1-11.

Поступила в редакцию 22/V 1998 г.