

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. П., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
2. Дроздов П. П., Зельдович Я. Б. Диффузионные явления у пределов распространения пламени. Экспериментальное исследование флегматизации взрывчатых смесей окиси углерода // ЖФХ.— 1943.— 17, вып. 3.— С. 134—144.
3. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1944.
4. Кокочавили В. П. Особенности горения смесей водорода с бромом // ЖФХ.— 1951.— 25, вып. 4.— С. 444—452.
5. Баренблатт Г. П., Зельдович Я. Б., Истратов А. Г. О диффузионно-тепловой устойчивости ламинарного пламени // ПМГФ.— 1962.— № 4.— С. 21—26.
6. Sivashinsky G. I. Diffusional-thermal theory of cellular flames // Combust. Sci. Techn.— 1977.— 15.— P. 137—146.
7. Алдушин А. П., Каспарян С. Г. О теплодиффузионной неустойчивости фронта горения // Докл. АН СССР.— 1979.— 244, № 1.— С. 67—70.
8. Алдушин А. П., Каспарян С. Г., Шкадский К. Г. Образование двумерной ячеистой структуры в теплодиффузионном пламени // Там же.— 1979.— 247, № 5.— С. 1112—1115.
9. Joulin G., Clavin P. Linear stability analysis of nonadiabatic flames: diffusional-thermal model // Combust. Flame.— 1979.— 35.— P. 139—153.
10. Истратов А. Г., Либрович В. Б. О влиянии процессов переноса на устойчивость плоского фронта пламени // ПММ.— 1966.— 30, № 3.— С. 451—466.
11. Sivashinsky G. I. Nonlinear analysis of hydrodynamic instability in laminar flames. I. Derivation of basic equations // Acta Astronautica.— 1977.— 4.— P. 1177—1206.
12. Pelee P., Clavin P. Influence of hydrodynamics and diffusion upon the stability limits of laminar premixed flames // J. Fluid Mech.— 1982.— 124.— P. 219—237.
13. Patnaik G., Kailasanath K., Oran E. S. et al. Detailed numerical simulations of cellular flames // Twenty—second Symp. (Int.) on Combustion., The Combust. Inst., 1988.— P. 1517—1526.
14. Махвиладзе Г. М., Щербак С. Б. Численный метод исследования нестационарных пространственных движений сжимаемого газа // ИФЖ.— 1980.— 38, № 3.— С. 528—535.
15. Махвиладзе Г. М., Мелихов В. И., Мелихов О. И. Распространение пламени в закрытом канале // ФГВ.— 1987.— 23, № 3.— С. 30—36.
16. Зулиян Г. А., Махвиладзе Г. М., Мелихов В. И. Численное исследование формы и структуры ламинарного пламени/АН СССР. ИПМ.— Препр.— М., 1991.

г. Москва

Поступила в редакцию 9/IV 1992

УДК 536.422

В. А. Бураков, С. Ф. Санду

ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

Работа посвящена математическому моделированию нестационарного прогрева и термохимического разрушения углепластиковых теплозащитных материалов многосоставных стенок в дозвуковом высокотемпературном двухфазном потоке при наличии капельного химического реагирования с инерционно осаждающимися жидкими частицами κ -фазы оксидов металлов. Обсуждаются некоторые результаты численного исследования нестационарного прогрева и термохимического разрушения типичного прессованного углепластика при тепловом и химическом воздействии жидких частиц оксида алюминия.

Модели термохимического разрушения углеграфитовых (графиты, пирографиты, углерод-углеродные композиционные материалы) и углепластиковых теплозащитных материалов (ТЗМ) за счет гетерогенных химических реакций с активными компонентами в высокотемпературных однофазных (газовых) потоках разработаны достаточно полно [1—6]. Течение высокотемпературных двухфазных потоков в каналах энерго-

© В. А. Бураков, С. Ф. Санду, 1992.

4*

51

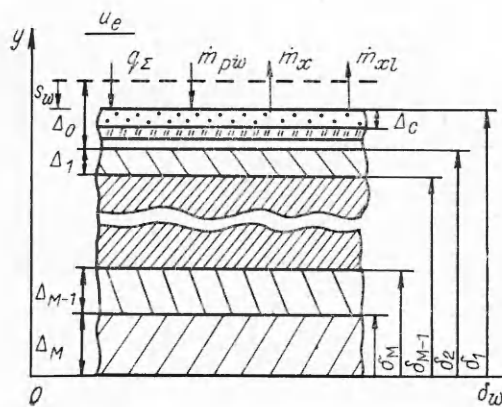


Рис. 1. Физическая схема процесса термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок при инерционном осаждении жидких частиц к-фазы.

установок сложной формы с искривленными линиями тока газа сопровождается инерционным осаждением жидких частиц конденсированной фазы (к-фазы) оксидов металлов. В областях осаждения появляется ряд дополнительных механизмов уноса массы ТЗМ вследствие теплового, химического и механического воздействия горячих жидких частиц к-фазы. Один из них — химическое реагирование частиц к-фазы оксидов металлов с углеродом за счет протекания реакции восстановления при высоких температурах поверхности [7]. В настоящее время модели химического воздействия жидких частиц к-фазы на углеродистые и углепластиковые ТЗМ в литературе отсутствуют. Известны только эмпирические соотношения, связывающие массовую скорость поверхностного уноса ТЗМ и массовый поток осаждающихся частиц через опытный коэффициент, определяемый на основе модельных испытаний [8].

В результате комбинированного конвективно-радиационного и контактного теплообмена углепластиковые ТЗМ подвергаются термодеструкции с образованием науглероженного обугленного слоя и фильтрующихся к поверхности газообразных продуктов. В условиях небольших массовых потоков осаждающиеся жидкие частицы к-фазы оксидов металлов pokrывают незначительную долю поверхности твердого каркаса обугленного слоя, вступают в области высоких температур в химическую реакцию восстановления твердым углеродом, а затем уносятся вместе с продуктами разрушения. Такой механизм поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ условно назван капельным химическим реагированием (химической эрозией). При этом часть мелких жидких частиц к-фазы может шаржировать (проникать) в поры обугленного слоя.

Другой механизм поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ — неравновесные гетерогенные реакции с активными компонентами двухфазного потока. В высокотемпературной химически реагирующей С — Н — О — N-среде в общем случае представляют интерес гетерогенные реакции окисления, углеводородные реакции и реакции нитрования. Физическая схема процесса показана на рис. 1.

Математическое моделирование термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок в дозвуковом двухфазном потоке при инерционном осаждении полидисперсных жидких частиц к-фазы оксидов металлов основывается на следующих основных допущениях:

1) течение в двухфазном пограничном слое (ламинарном или турбулентном) замороженное, и выполняется аналогия между процессами тепло- и массопереноса (число Льюиса — Семенова $Le = 1$);

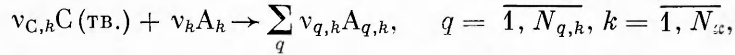
2) используется приближение бинарной смеси газов. Эффекты термо- и бародиффузии несущественны по сравнению с массовой диффузией;

3) собственно газ представляет смесь конечного числа компонентов, каждый из которых подчиняется уравнению состояния идеального газа;

4) жидкие частицы к-фазы рассматриваются как сплошная среда «газа» частиц, заполняющая совместно со сплошной средой собственно газа один и тот же объем [9];

5) распределения частиц к-фазы по размерам аппроксимируются распределением частиц по конечному числу групп, в каждой из которых содержатся частицы одного размера;

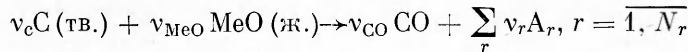
6) термохимическое разрушение углерода обугленного слоя происходит за счет протекания N_x независимых неравновесных гетерогенных реакций с активными газообразными реагентами (H_2O , CO_2 и др.) двухфазного потока, которые описываются следующим стехиометрическим уравнением:



где A_k, A_q — условные химические символы реагентов и продуктов реакции; v_c, v_k, v_q — стехиометрические коэффициенты; N_q — число газообразных продуктов реакции; k — порядковый номер реакции; тв. — твердый;

7) выпадающие жидкие частицы к-фазы занимают незначительную долю химически активной поверхности;

8) химическая реакция восстановления твердым углеродом обугленного слоя оксидов металлов в расплавленном состоянии при высоких температурах рассматривается на основе предположения об эффективной кинетике, согласно которому реальный механизм не учитывается, а считается, что реакция одноступенчатая, протекает с выделением газообразных продуктов и описывается стехиометрическим уравнением



(MeO, A_r — условные химические символы оксидов металлов и газообразных продуктов; $v_c, v_{MeO}, v_{CO}, v_r$ — стехиометрические коэффициенты, N_r — число газообразных продуктов химической реакции восстановления (кроме CO), ж. — жидкий);

9) задача термохимического разрушения решается в одномерном приближении для плоской многосоставной стенки из разнородных материалов, между слоями которой выполняются условия идеального теплового контакта;

10) внутренние физико-химические и тепло- и массообменные процессы в углепластиковых ТЗМ описываются на основе общих законов сохранения массы, импульса и энергии [10, 11] при известных допущениях [1, 2] в рамках модели двухфазной, $(N_g + 1)$ -компонентной, одно-температурной, недеформируемой, пористой реагирующей среды.

В рамках принятых допущений одномерная нелинейная система уравнений нестационарного тепло- и массопереноса в углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок имеет вид (см. рис. 1)

$$(\rho c)_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{m}_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta H_r, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_g}{\partial y} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad \rho = \rho_v [1 - \xi (1 - K)], \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\dot{m}_g K_{i,g}) = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \varphi_i(T), \quad \sum_i \varphi_i(T) = 1, \quad \sum_i K_{i,g} = 1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = k_r (1 - \xi)^{n_r} \exp\left(-\frac{E_r}{RT}\right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial p_g}{\partial y} + F_g = 0, \quad (5)$$

$$p_g = \rho_g RT \sum_i \frac{K_{i,g}}{m_i}, \quad i = \overline{1, N_g}, \quad (6)$$

$$\delta_k < y < \delta_w(t), t > 0,$$

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right), m = \overline{1, M}, \quad (7)$$

$$\delta_{m+1} < y < \delta_m, t > 0,$$

где T — температура; ρ, c, λ — плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности; ξ — степень термодеструкции [0; 1]; $k_r, \bar{E}_r, n_r, \Delta H_r$ — предэкспоненциальный множитель; энергия активации, порядок и удельный тепловой эффект одностадийной химической реакции термодеструкции; \dot{m}_g, c_{pg} — массовая скорость и удельная теплоемкость газообразных продуктов термодеструкции; K — коксовое число; R — универсальная газовая постоянная; \bar{K}_i — массовая концентрация i -го газообразного компонента; φ_i — относительная доля i -го газообразного компонента при термодеструкции [10]; p — давление; F_g — сила сопротивления при движении газа в пористой среде; m_i — молекулярная масса i -го компонента; M — число разнородных инертных материалов многосоставной стенки; N_g — число газообразных продуктов термодеструкции. Нижние индексы эф, v, g, k относятся к эффективным теплофизическим характеристикам, исходному материалу, газообразным продуктам термодеструкции, условиям в контактах.

Дополнительно также предусмотрено независимое описание одностадийной химической реакции термодеструкции функцией арктангенса [12, 13] вместо закона Аррениуса (4):

$$\xi = \begin{cases} 0, & T \leq T_{н.р}, \\ A \operatorname{arctg} [m(T - T_{\max})] + B, & T_{н.р} < T < T_{к.р}, \\ 1, & T \geq T_{к.р}, \end{cases} \quad (8)$$

где A, B, m — параметры кинетики термодеструкции; $T_{н.р}, T_{к.р}, T_{\max}$ — характерные пороговые температуры начала, конца и максимальной скорости термодеструкции.

Для единственности решения системы уравнений (1)–(7) выставятся следующие граничные и начальные условия ($\dot{s}_w > 0$):

$$\theta_w \rho_g (v_g - \dot{s}_w) + \rho_s (1 - \theta_w) \dot{s}_w + \left(\frac{v_{\text{MeO}} m_{\text{MeO}}}{v_C m_C} \right) \dot{m}_{xL} = \rho_w (v_w - \dot{s}_w) = \dot{m}_\Sigma, \quad (9)$$

$$\dot{m}_\Sigma = \dot{m}_g + (1 - \theta_w) \sum_i \sum_k R_{sk,i} + \left(1 + \frac{v_{\text{MeO}} m_{\text{MeO}}}{v_C m_C} \right) \dot{m}_{xL}, p_{g,w} = p_w, \quad (10)$$

$$\dot{m}_g k_{i,g} + (1 - \theta_w) \sum_k R_{sk,i} + \left(1 + \frac{v_{\text{MeO}} m_{\text{MeO}}}{v_C m_C} \right) \dot{m}_{xL} k_{i,xL} = j_{i,w} + \dot{m}_\Sigma k_{i,w},$$

$$i = \overline{1, N_w}, k = \overline{1, N_x}, \sum_i k_{i,xL} = 1, \sum_i k_{i,w} = 1, \sum_i j_{i,w} = 0, \quad (11)$$

$$\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{m-0}} + \dot{m}_\Sigma h_w = q_\Sigma + \dot{m}_g h_g + \dot{m}_x h_s + \dot{m}_{xL} h_s +$$

$$+ \left(\frac{v_{\text{MeO}} m_{\text{MeO}}}{v_C m_C} \right) \dot{m}_{xL} h_p, \quad (12)$$

$$\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{1+0}} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{1-0}}, T \Big|_{\delta_{1+0}} = T \Big|_{\delta_{1-0}} = T_{k,1}(t), \quad (13)$$

$$\dot{m}_g \Big|_{\delta_{1+0}} = 0, k_{i,g} \Big|_{\delta_{1+0}} = 0, \quad (14)$$

$$\lambda_M \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{m+1+0}} = \lambda_{m+1} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_{m+1-0}}, T \Big|_{\delta_{m+1+0}} = T \Big|_{\delta_{m+1-0}} = T_{k,m+1}(t), \quad (15)$$

$$\lambda_M \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{+0} = q_M, m = \overline{1, M-1}, M > 1, \quad (16)$$

$$T(y, 0) = T_H, \xi(y, 0) = 0, s_w(0) = 0, \quad (17)$$

где $R_{s,i}$ — массовая скорость образования (исчезновения) i -го компонента за счет неравновесных гетерогенных реакций; ji — диффузионный массовый поток i -го компонента; \dot{m} — массовая скорость термохимического разрушения или вдува массы; h — полная энтальпия; v — скорость газа; T_n — начальная температура; $s_w(t)$ — текущая толщина унесенного слоя материала; θ_w — пористость; q_Σ — суммарный тепловой поток на поверхности; q_M — тепловой поток на наружной поверхности многосоставной стенки; N_w — число газообразных компонентов смеси газов на поверхности. Нижние индексы w, x, xL, s, p, Σ относятся соответственно к условиям на поверхности, термохимическому разрушению за счет неравновесных гетерогенных реакций, термохимическому разрушению за счет капельного химического реагирования с жидкими частицами к-фазы оксидов металлов, твердой науглероженной фазе, частицам к-фазы и к суммарным характеристикам.

Предлагаемая общая математическая модель поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ за счет протекания комплекса неравновесных гетерогенных реакций с активными компонентами С — Н — О — N-среды при наличии капельного химического реагирования с жидкими частицами к-фазы оксидов металлов основывается на известном в механике реагирующих сред упрощении $Le = 1$, представлении диффузионного массового потока i -го компонента равенством $j_{i,w} = \rho_e u_e St (k_{i,w} - k_{i,e})$, уравнения индивидуальной химической кинетики гетерогенных реакций в форме [3] и выражении источника (стока) массы $R_{sk,i}$ в виде [10]. Используя граничные условия (11), (12), получаем нелинейную систему $(N_x + N_w + 2)$ алгебраических уравнений для определения текущих значений $B_{xk}, k_{i,w}, m_w, T_u$:

$$B_\Sigma = B_g + \sum_k B_{xk} + B_{xL}, \quad (18)$$

$$B_{xk} = \left(\frac{v_{C,k} m_C}{v_k^{m_{Ak}}} \right) \Omega_{xk}^{-1} k_{Ak,w}, \quad k = \overline{1, N_x},$$

$$k_{i,w} = \frac{1}{1 + B_\Sigma} \left[B_g k_{i,g} + \frac{(1 - \theta_w) \sum_k R_{sk,i}}{\rho_e u_e St} + B_{xL} k_{i,xL} + k_{i,e} \right], \quad i = \overline{1, N_w},$$

$$\Omega_{xk} = \rho_e u_e St \frac{T_w^{v_{C,k} + k} v_{C,k} m_C}{(1 - \theta_w) k_{xk} p_w v_k m_i} \exp \left(\frac{E_{xk}}{RT_w} \right),$$

$$m_w = (1 + B_\Sigma) \left[\frac{B_g}{m_g} + \frac{1}{m_C} \sum_k \sum_q \left(\frac{v_{q,k} - v_k}{v_{C,k}} \right) \bar{B}_{xk} + \frac{B_{xL}}{m_{xL}} + \frac{1}{m_e} \right]^{-1},$$

$$\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_w=0} = \rho_e u_e St \left[\sum_i k_{i,e} (h_{i,e} - h_{i,w}) - \sum_k B_{xk} \Delta H_{xk} - B'_{xL} \Delta H_{xL} \right] + q_r + q_p, \quad i = \overline{1, N_w},$$

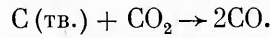
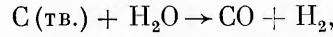
$$B_g = \frac{\dot{m}_g}{\rho_e u_e St}, \quad B_{xk} = \frac{\dot{m}_{xk}}{\rho_e u_e St}, \quad B_{xL} = \left(1 + \frac{v_{MeO} m_{MeO}}{v_C m_C} \right) \frac{\dot{m}_{xL}}{\rho_e u_e St},$$

$$B'_{xL} = \frac{\dot{m}_{xL}}{\rho_e u_e St},$$

где k_{xk}, E_{xk} — индивидуальные термокинетические параметры (предэкспоненциальный множитель и энергия активации) неравновесных гетерогенных реакций; m_C, m_{xL} — молекулярные массы углерода и газообразных продуктов капельного химического реагирования; $B_g, B_{xk}, B_{xL}, B'_{xL}, B_\Sigma$ — безразмерные массовые скорости термохимического разрушения или параметры вдува (проницаемости); $\rho_e u_e St$ — текущий коэффициент тепло-массопереноса; St — число Стантона; q_r, q_p — радиационная и контактная составляющие суммарного теплового потока на поверхности; ΔH —

удельный тепловой эффект; $\omega_{1,k}$ — константа. Нижний индекс e относится к параметрам на внешней границе двухфазного пограничного слоя.

В качестве ее приложения рассматривается термохимическое разрушение углепластиковых ТЗМ за счет протекания двух неравновесных гетерогенных реакций окисления с активными кислородсодержащими компонентами:



В случае модели индивидуальной химической кинетики имеем:

$$B_{x1} = \left(\frac{m_C}{m_{H_2O}} \right) \Omega_{x1}^{-1} k_{H_2O,w}, \quad B_{x2} = \left(\frac{m_C}{m_{CO_2}} \right) \Omega_{x2}^{-1} k_{CO_2,w},$$

$$k_{H_2O,w} = \frac{B_g k_{H_2O,g} + k_{H_2O,e}}{1 + B_\Sigma + \Omega_{x1}^{-1}}, \quad k_{CO_2,w} = \frac{B_g k_{CO_2,g} + k_{CO_2,e}}{1 + B_\Sigma + \Omega_{x2}^{-1}},$$

$$\Omega_{x1} = \rho_e u_e \text{St} \frac{T_w^{\omega_{1,1}} m_C}{(1 - \theta_w) k_{x1} p_w m_w} \exp\left(\frac{E_{x1}}{RT_w}\right),$$

$$\Omega_{x2} = \rho_e u_e \text{St} \frac{T_w^{\omega_{1,2}} m_C}{(1 - \theta_w) k_{x2} p_w m_w} \exp\left(\frac{E_{x2}}{RT_w}\right),$$

$$m_w = (1 + B_\Sigma) \left(\frac{B_g}{m_g} + \frac{B_{x1}}{m_C} + \frac{B_{x2}}{m_C} + \frac{B_{xL}}{m_{xL}} + \frac{1}{m_e} \right)^{-1},$$

$$\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_w=0} = \rho_e u_e \text{St} \left[\sum_i k_{i,e} (h_{i,e} - h_{i,w}) - B_{x1} \Delta H_{x1} - B_{x2} \Delta H_{x2} - B'_{xL} \Delta H_{xL} \right] +$$

$$+ q_r + q_p, \quad i = \overline{1, N_w},$$

где B_{x1}, B_{x2} — безразмерные массовые скорости поверхностного термохимического разрушения, обусловленные протеканием неравновесных гетерогенных реакций с активными компонентами H_2O, CO_2 , имеющих термокинетические параметры k_{x1}, E_{x1} и k_{x2}, E_{x2} соответственно.

Математическая модель поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ, в которой используются эффективные термокинетические параметры ($k_{xh} = k_x, E_{xh} = E_x$), имеет вид

$$B_\Sigma = B_g + B_x + B_{xL}, \quad (19)$$

$$B_x = \frac{B_g \beta_{m,g} + \beta_{m,e}}{1 + (1 + B_\Sigma) \Omega_x},$$

$$\Omega_x = \rho_e u_e \text{St} \frac{T_w^{\omega_1} m_C}{(1 - \theta_w) k_x p_w m_w} \exp\left(\frac{E_x}{RT_w}\right),$$

$$m_w = (1 + B_\Sigma) \left(\frac{B_g}{m_g} + \frac{B_x}{m_C} + \frac{B_{xL}}{m_{xL}} + \frac{1}{m_e} \right)^{-1},$$

$$\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta_w=0} = \rho_e u_e \text{St} \left[\sum_i k_{i,e} (h_{i,e} - h_{i,w}) - B_x \Delta H_x - B'_{xL} \Delta H_{xL} \right] +$$

$$+ q_r + q_p, \quad i = \overline{1, N_w},$$

$$\Delta H_x = \frac{\frac{m_C}{m_{H_2O}} (B_g k_{H_2O,g} + k_{H_2O,e}) \Delta H_{x1} + \frac{m_C}{m_{CO_2}} (B_g k_{CO_2,g} + k_{CO_2,e}) \Delta H_{x2}}{B_g \beta_{m,g} + \beta_{m,e}},$$

где $\beta_{m,e}, \beta_{m,g}$ — окислительные потенциалы по отношению к углероду кислородсодержащих компонентов внешнего двухфазного потока и газооб-

разных продуктов термодеструкции; ΔH_x — эффективный удельный тепловой эффект гетерогенных реакций окисления.

Представленные соотношения без учета капельного химического реагирования переходят для углеграфитовых ТЗМ ($B_g = B_{xL} = 0$, $\theta_w = 0$) в известную двухпараметрическую диффузионно-кинетическую модель $B_x = B_x(\Omega_x, \beta_{m,e})$ [3].

Практическое применение полученных зависимостей (18), (19) возможно только при доопределении функций и параметров B_{xL} , B_{xL} , $k_{i,xL}$, m_{xL} , характеризующих капельное химическое реагирование жидких частиц к-фазы с углепластиковыми ТЗМ.

Предлагаемая математическая модель капельного химического реагирования углепластиковых ТЗМ с полидисперсными жидкими частицами к-фазы оксидов металлов основывается на представлении их как континуума активного «газа» частиц, вступающего по аналогии с неравновесными гетерогенными реакциями окисления в однофазных (газовых) потоках [3] в химическую реакцию восстановления твердым углеродом по кинетическому уравнению первого порядка:

$$\dot{m}_{xL,j} = (1 - \theta_w) k_{xL} T_w^{-\omega_2} \rho_w^{\omega_3} \rho_{pw,j} \exp\left(-\frac{E_{xL}}{RT_w}\right), \quad (20)$$

$$\dot{m}_{xL} = \sum_j \dot{m}_{xL,j}, \quad j = \overline{1, N_{p,xL}}.$$

Здесь k_{xL} , E_{xL} — эффективные термокинетические параметры капельного химического реагирования жидких частиц к-фазы оксидов металлов с углеродом обугленного слоя; $N_{p,xL}$ — число фракций жидких частиц к-фазы, вступающих в капельное химическое реагирование; ω_2 , ω_3 — константы.

Текущая плотность $\rho_{pw,j}$ находится из баланса массы континуума жидких частиц к-фазы j -й фракции в элементарном объеме, прилегающем к поверхности. В балансе массы результирующий массовый поток инерционно осаждающихся жидких частиц к-фазы j -й фракции равен массовой скорости исчезновения (стока) к-фазы за счет капельного химического реагирования с углеродом и шаржирования в поры обугленного слоя ($\dot{s}_w \ll \dot{V}_{pw,j}$):

$$\dot{m}_{pw,j} - \rho_{pw,j} \dot{V}_{pw,j} = \left(\frac{v_{MeO} m_{MeO}}{v_C m_C}\right) \dot{m}_{xL,j} + \dot{m}_{pg,j}, \quad (21)$$

где $\dot{m}_{pw,j}$, $\dot{V}_{pw,j}$ — массовый поток и нормальная составляющая скорости частиц к-фазы j -й фракции при осаждении на стенку; $\dot{m}_{pg,j}$ — массовый поток частиц к-фазы j -й фракции шаржирующих (проникающих) в поры обугленного слоя.

Соотношения (20) и (21) позволяют получить безразмерную массовую скорость поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ в замороженном высокотемпературном двухфазном пограничном слое при капельном химическом реагировании с инерционно осаждающимися полидисперсными жидкими частицами к-фазы оксидов металлов:

$$B'_{xL,j} = \left(\frac{v_C m_C}{v_{MeO} m_{MeO}}\right) \left(\frac{\dot{m}_{pw,j} - \dot{m}_{pg,j}}{\rho_e u_e St}\right) (1 + \Omega_{xL,j})^{-1}, \quad (22)$$

$$\Omega_{xL,j} = \frac{v_{pw,j} \bar{T}_w^{\omega_2} v_C m_C}{(1 - \theta_w) k_{xL} \rho_w^{\omega_3} v_{MeO} m_{MeO}} \exp\left(\frac{E_{xL}}{RT_w}\right),$$

$$B'_{xL} = \sum_j B'_{xL,j}, \quad j = \overline{1, N_{p,xL}},$$

Представленная континуальная диффузионно-кинетическая модель (КДКМ) (22) одновременно охватывает кинетический, переходный и

диффузионный режимы капельного химического реагирования углерода обугленного слоя с жидкими частицами к-фазы оксидов металлов различной физической природы. Это следует из возможности выражения безразмерной массовой скорости B'_{xL} как среднегармонического значения безразмерных массовых скоростей капельного химического реагирования в кинетическом $B'_{xL,R}$ и диффузионном $B'_{xL,p}$ режимах:

$$B'_{xL} = \left(\frac{1}{B'_{xL,R}} + \frac{1}{B'_{xL,p}} \right)^{-1}, \quad B'_{xL,p} = \left(\frac{\nu_C m_C}{\nu_{MeO} m_{MeO}} \right) \left(\frac{\dot{m}_{pw} - \dot{m}_{pg}}{\rho_e u_e St} \right),$$

$$B'_{xL,R} = (1 - \theta_w) k_{xL} T_w^{-\omega} p_w^{\omega_3} V_{pu}^{-1} \exp \left(- \frac{E_{xL}}{RT_w} \right) \cdot \left(\frac{\dot{m}_{pw} - \dot{m}_{pg}}{\rho_e u_e St} \right).$$

Дополнительные параметры капельного химического реагирования $k_{i,xL}$, m_{xL} в области высоких температур и давлений должны находиться из экспериментальных данных газохроматографического анализа или по результатам термодинамического расчета, например, системы Al — O — C [14] для жидких частиц оксида алюминия.

Текущая скорость поверхностного термохимического разрушения и толщина унесенного слоя углепластиковых ТЗМ определяются из соотношений

$$\dot{s}_w(t) = \frac{\rho_e u_e St (P_x + P'_{xL})}{k_p v}, \quad s_w(t) = \int_t^0 \dot{s}_w(t) dt. \quad (23)$$

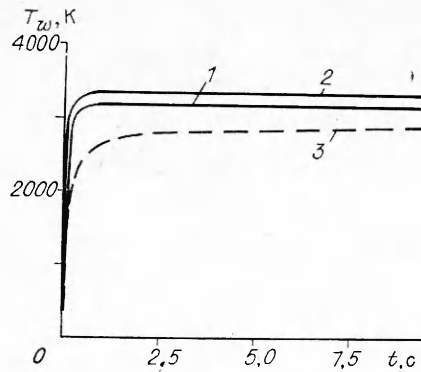
Численная реализация математической модели (1) — (10), (13) — (17), (19) — (22), (23) проводится методом конечных разностей по четырехточечной, полностью неявной, двухслойной по времени, одношаговой итерационной схеме на неравномерной пространственной и временной сетке. Для устранения нелинейности, обусловленной наличием подвижной границы вследствие поверхностного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ применяется метод выпрямления фронта (подстановка Ландау) [15]. Система разностных уравнений решается методом прогонки [16] до выполнения условий сходимости по итерациям. Разработана версия вычислительной программы АСМН1М-1 для ЭВМ [17].

В качестве примера обсуждаются некоторые результаты численного исследования нестационарного прогрева и термохимического разрушения типичного прессованного углепластика на основе термореактивного фенольно-формальдегидного связующего и угольного волокна в дозвуковом высокотемпературном двухфазном потоке при инерционном осаждении монодисперсных однотемпературных жидких частиц к-фазы оксида алюминия: $p_e = p_w = 4,0$ МПа, $T_e = 3460$ К, $\rho_e u_e St_0 = 1,5$ кг/(м² · с), $\beta_{m,g} = 0$, $\beta_{m,e} = 0,12$, $\dot{m}_{pw} = 30$ кг/(м² · с), $T_{pe} = T_{pw} = 3460$ К, $\Delta_0 = 0,02$ м. $T_n = 300$ К, $t_a = 10$ с.

На рис. 2 показаны кривые изменения текущей температуры поверхности углепластика при различных условиях теплового и химического воздействия жидких частиц к-фазы оксида алюминия. Как видно, результаты опорного расчета (кривая 1) занимают промежуточное положение, что по отношению к кривой 2 обусловлено повышенным поверхностным термохимическим разрушением за счет капельного химического реагирования с большим эндотермическим эффектом, а по отношению к кривой 3 — дополнительным прогревом поверхности вследствие контактного теплообмена при инерционном осаждении частиц. На рис. 3 приведены данные по динамике поверхностного термохимического разрушения углепластика, демонстрирующие, что к моменту времени $t_a = 10$ с толщина унесенного слоя материала более чем в 4 раза превышает соответствующее значение, полученное без учета теплового и химического воздействия жидких частиц к-фазы.

Рис. 2. Расчет изменения во времени температуры поверхности углепластика.

1 — опорный расчет при тепловом и химическом воздействии к-фазы; 2 — при тепловом воздействии к-фазы; 3 — без учета теплового химического воздействия к-фазы.



Химическое реагирование жидких частиц к-фазы оксида алюминия и углерода обугленного слоя протекает в переходной области с заметным влиянием кинетических факторов. На рис. 4 построены зависимости изменения во времени глубины зоны термодеструкции δ_r и толщины обугленного слоя Δ_c , определяемые по положению фронтов $\xi = 0$ и $\xi = 1$ соответственно, при различных условиях воздействия к-фазы. Величины δ_r и Δ_c в опорном расчете сначала больше (вследствие дополнительного подвода тепла жидкими частицами), а затем за счет повышенного термохимического разрушения становятся меньше аналогичных значений, вычисленных без учета влияния к-фазы.

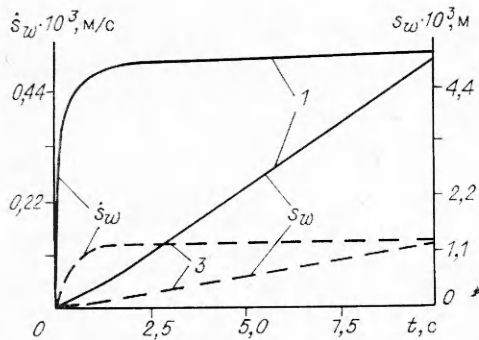
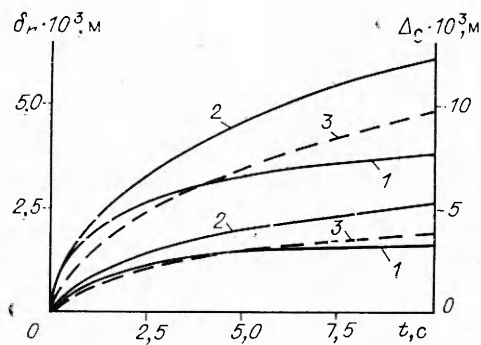


Рис. 3. Динамика поверхностного термохимического разрушения углепластика (обозначения см. на рис. 2).

Представленная новая физико-математическая модель нестационарного прогрева и термохимического разрушения углепластиковых ТЭМ в дозвуковом высокотемпературном двухфазном потоке, в которой расчет капельного химического реагирования проводится по КДКМ, дает возможность прогнозировать ухудшение работоспособности теплозащиты энергоустановок при тепловом и химическом воздействии жидких частиц к-фазы оксидов металлов без проведения большого числа модельных и натуральных испытаний.

Рис. 4. Изменение во времени глубины зоны термодеструкции (верхние кривые) и толщины обугленного слоя (нижние) углепластика (обозначения см. на рис. 2).



ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита.— М.: Энергия, 1976.
2. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками.— М.: Машиностроение, 1975.
3. Бояринцев В. И., Звягин Ю. В. Исследование разрушения углеграфитовых материалов при высоких температурах // ТВТ.— 1975.— 13, № 5.— С. 1045.
4. Кесвани С. Т., Андироглу Е., Кемпбел Дж. Д. и др. Эрозия графитовых сопел в модельных ракетных двигателях // АЭКТ.— 1986.— 4, № 1.— С. 117.
5. Куо К., Keswani S. T. A comprehensive theoretical model for carbon — carbon composite nozzle recession // Combust. Sci. Technol.— 1985.— 42.— Р. 145.
6. Зинченко В. Н., Якимов А. С. Режимы термохимического разрушения углефенольного композиционного материала под действием теплового потока // ФГВ.— 1988.— 24, № 2.— С. 141.
7. Механизм и кинетика восстановления металлов.— М.: Наука, 1970.
8. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник.— М.: Машиностроение, 1988.
9. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред.— М.: Наука, 1978.
10. Никитин А. Т., Юревич Ф. Б. Теоретическое исследование нестационарного нагрева и уноса коксующихся полимерных материалов // Тепло- и массоперенос.— Т. 2, Ч. 2.— Минск: Изд-во ИТМО АН БССР, 1972.— С. 295.
11. Гришин А. М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973.
12. Шленский О. Ф. Тепловые свойства стеклопластиков.— М.: Химия, 1973.
13. Страхов В. Л., Чубаков Н. Г. Расчет нестационарного прогрета и уноса массы вспучивающихся покрытий в горячих газовых потоках // ИФЖ.— 1988.— 55, № 4.— С. 571.
14. Кожевников Г. Н., Водопьянов А. Г. Низшие окислы кремния и алюминия в электрометаллургии.— М.: Наука, 1977.
15. Будаков Б. М., Гольдман Н. Л., Успенский А. Б. Разностные схемы с выпрямлением фронтов для решения многофронтовых задач типа Стефана // Докл. АН СССР.— 1966.— 167, № 4.— С. 735.
16. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М.: Наука, 1983.
17. Бураков В. А., Санду С. Ф. Численное решение задач нестационарной теплопроводности и уноса теплозащитных материалов при осаждении конденсированной фазы // Материалы Всесоюз. выставки программных комплексов по численному решению задач термомеханики.— М.: Изд-во МГТУ, 1990.— С. 10.

г. Томск

Поступила в редакцию 18/II 1992

УДК 541.126 ÷ 541.621 ÷ 546.47

В. А. Безпрозванных, В. А. Ермаков, А. А. Раздобреев

ИНДУКЦИОННЫЙ ПЕРИОД НАГРЕВА ЧАСТИЦ МЕТАЛЛА НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований лазерно-термохимического окисления частиц алюминия на стадии, предшествующей воспламенению. Найдены значения термодиффузионных констант и оптических постоянных оксидного слоя. Получена информация об изменении температуры мишени, фактора поглощения излучения, толщины слоя окисла в процессе нагрева. Обсуждаются возможности реализации термохимической неустойчивости.

Нагрев металлов излучением оптического квантового генератора — процесс существенно нестационарный. Динамика его определяется положительной обратной связью между окислением, ростом температуры и изменением поглощательной способности. Соответствующее сочетание режимно-геометрических параметров приводит к реализации термохимической неустойчивости, обеспечивающей возможность быстрого прогрета мишени до температуры, при которой не исключены эффекты взрывного испарения. Подобные условия могут реализоваться в фокусе излучения мощного лазера типа ЛАТУС-31, используемого при нанесении мелкодисперсных порошков металлов на различные поверхности. Дробление частиц может способствовать как оптимизации самого процесса нанесения

© В. А. Безпрозванных, В. Е. Ермаков, А. А. Раздобреев, 1992.