

УДК 536.422

**ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ
УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ ИНЕРЦИОННОМ ОСАЖДЕНИИ
ЖИДКИХ ГОРЯЩИХ АГЛОМЕРАТОВ АКТИВНОГО МЕТАЛЛА**

В. А. Бураков

*НИИ прикладной математики и механики,
634050 Томск*

Представлена новая физико-математическая модель и проведено параметрическое численное исследование основных закономерностей термохимического разрушения углепластиковых теплозащитных материалов в высокотемпературных двухфазных потоках при инерционном осаждении конденсированной фазы жидких горящих агломератов активного металла.

Применение высокоэнергетических топлив привело к возрастанию уноса массы внутренней разрушающейся (аблирующей) теплозащиты энергоустановок в высокотемпературных двухфазных потоках, в том числе из-за воздействия осаждающейся инерционно конденсированной фазы (к-фазы) жидких горящих агломератов активного металла и частиц его оксида. В работах [1, 2] предложена континуальная диффузионно-кинетическая модель термохимического разрушения углепластиковых теплозащитных материалов (ТЗМ) при инерционном осаждении жидких частиц к-фазы оксидов металлов.

Цель данной работы заключается в физико-математическом моделировании ранее совершенно не изученного процесса термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок в высокотемпературных двухфазных потоках при инерционном осаждении к-фазы жидких горящих агломератов активного металла.

В принятой физической модели рассматривается взаимодействие высокотемпературных двухфазных потоков алюминизированных топлив с углепластиковыми ТЗМ многосоставных стенок в условиях инерционного осаждения частично закрытых «нашлепкой» оксида алюминия жидких агломератов активного алюминия. Инерционное осаждение продолжается в течение времени $0 < t \leq t_{oc}$, а при $t > t_{oc}$ прекращается. Сумма мольных долей окисляющих компонентов (H_2O , CO_2 и др.) уменьшается за время $0 < t \leq t_{oc}$ до своего термодинамически равновесного значения.

Выбор физической модели теплового и химического воздействия жидких горящих агломератов активного алюминия на углепластиковые ТЗМ зависит от динамики их взаимодействия со стенкой. В настоящее время такие прямые данные отсутствуют, поэтому для дальнейшего анализа привлекаются представления о близком по своему характеру тепловом и динамическом взаимодействии при соударении капли с перегретой поверхностью [3]. В их рамках можно выделить три схемы динамики взаимодействия жидких горящих агломератов активного алюминия с поверхностью углепластиковых ТЗМ (рис. 1). При выполнении условия $We < We_*$ (где We — число Вебера капли) имеет место слабое взаимодействие горящих агломератов со стенкой, когда без дополнительной деформации происходит его упругий отскок (рис. 1,а). В области $We_* \leq We \leq We_{**}$ наблюдается значительная деформация агломерата и взаимодействие с поверхностью осуществляется через разделяющую паровую прослойку (рис. 1,б),

в которой вследствие интенсивного испарения металла поддерживается избыточное давление, определяемое гидродинамикой течения пара в прослойке. При $We > We_{**}$ (рис. 1, в) вследствие чрезмерной силы происходит сильное взаимодействие, агломерат при торможении значительно деформируется и дробится на мелкие осколки Al/Al_2O_3 , догорающие в газовой фазе.

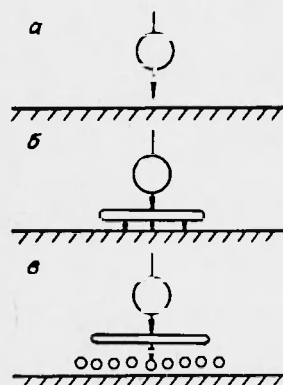
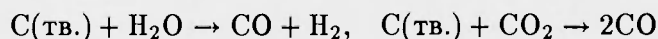


Рис. 1. Схемы динамики взаимодействия жидких горящих агломератов активного металла со стенкой.

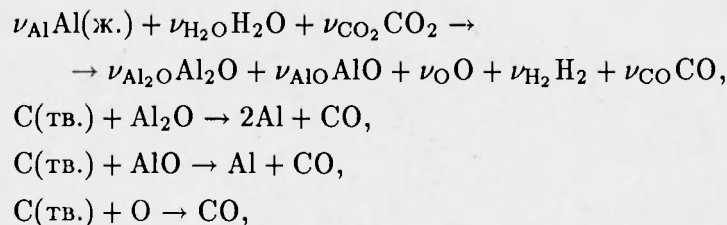
Такой новый возможный механизм может служить дополнительным к известным механизмам образования мелкой фракции частиц оксида алюминия в высокотемпературных двухфазных потоках и исключительно обусловлен сильным взаимодействием агломерата со стенкой. По данным [3]: $We_* = 2 \div 3$ и $We_{**} = 80 \div 100$. Разработка физической модели процесса основывается на варианте сильного взаимодействия при инерционном осаждении крупных жидких горящих агломератов алюминия на поверхность углепластиковых ТЗМ, когда можно выделить следующие две области.

В области I ($K_{o,w} \geq K_{o,w}^*$, где $K_{o,w}$ — массовая концентрация окисляющих компонентов на поверхности; $K_{o,w}^*$ — пороговое значение массовой концентрации окисляющих компонентов на поверхности,

при котором прекращается горение агломератов) жидкие горящие агломераты алюминия без прямого взаимодействия со стенкой вызывают повышенный относительно учета только неравновесных гетерогенных реакций окисления [4]

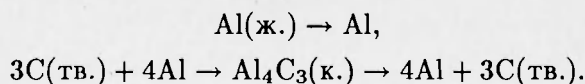


термохимический унос углерода обугленного слоя углепластиковых ТЗМ. Это происходит вследствие его «ожога» активными компонентами продуктов горения и диссоциации осколков Al/Al_2O_3 [5, 6]:



где $\nu_{Al}, \nu_{H_2O}, \dots$ — стехиометрические коэффициенты.

В области II ($K_{o,w} < K_{o,w}^*$), когда быстро снижающаяся во времени за счет неравновесных гетерогенных реакций окисления концентрация активных окисляющихся компонентов на поверхности углепластиковых ТЗМ становится меньше пороговой, горение жидких агломератов активного металла прекращается, однако процесс испарения продолжается. В этом случае повышенный относительно учета только неравновесных гетерогенных реакций окисления унос массы углерода обугленного слоя обусловлен его «ожогом» парами атомарного алюминия осколков Al/Al_2O_3 [5]



Ответственная за повышенный унос массы реакция образования карбида алюминия Al_4C_3 с последующей его диссоциацией в области высоких температур описывает механизм химического «выкрашивания» углерода. Такой новый механизм разрушения углепластиковых ТЗМ характерен для высокотемпературных двухфазных потоков при инерционном осаждении агломератов металла и отличается от химической эрозии, когда унос углерода происходит в составе газообразной окиси углерода, а также механического «выкрашивания», при котором углерод уносится в твердой фазе. Кроме того, увеличение термохимического уноса ТЗМ в областях I и II обусловлено повышенным за счет недогорания окислительным потенциалом $\beta_{m,e}$ высокотемпературного двухфазного потока.

Математическое моделирование повышенного термохимического уноса массы углепластиковых ТЗМ в основной представляющей интерес области II, когда многие детали процесса взаимодействия не известны, и сведения о них отсутствуют в литературе, базируется на упрощенном подходе в рамках следующих допущений:

- 1) весь образовавшийся при испарении атомарный алюминий расходуется на карбидообразование (диффузионный режим);
- 2) карбид алюминия полностью диссоциирует при высоких температурах поверхности (равновесный режим);
- 3) вторичные реакции не учитываются.

Отсюда, в соответствии с предлагаемой упрощенной континуальной диффузионно-равновесной моделью, дополнительную скорость термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ за счет химического взаимодействия с жидкими агломератами алюминия можно найти из следующих соотношений:

$$\begin{aligned}\dot{m}_c &= \left(\frac{3m_C}{m_{Al_4C_3}} \right) \dot{m}_d, \\ \dot{m}_d &= \dot{m}_{Al_4C_3}, \\ \dot{m}_{Al_4C_3} &= \left(\frac{3m_C}{4m_{Al}} \right) [(1 - \alpha_{Al_2O_3}) \dot{m}_{a,w} + \rho_e u_e St K_{Al,e}],\end{aligned}$$

где \dot{m} — массовая скорость; m — молекулярная масса; $\dot{m}_{a,w}$ — массовая скорость осаждения агломератов на стенку; $\rho_e u_e St$ — текущий коэффициент теплопереноса; St — число Стантона; $K_{Al,e}$ — массовая концентрация атомарного алюминия в ядре потока; $\alpha_{Al_2O_3}$ — доля поверхности агломератов, закрытой «нашлепкой» оксида алюминия, которая блокирует испарение; индексы C, Al, Al_4C_3 , d относятся к углероду, алюминию, карбиду алюминия и процессу диссоциации.

Полученная величина дополнительного термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ \dot{m}_c вследствие механизма химического «выкрашивания» максимальна и, возможно, потребует определенной корректировки при наличии надежных экспериментальных данных. Расчет нестационарного прогрева и уноса массы ТЗМ многосоставных стенок проводится на основе [1].

Таким образом, с общетеоретической точки зрения сформулированные представления о повышенном термохимическом уносе ТЗМ в высокотемпературных двухфазных потоках при инерционном осаждении к-фазы жидких горящих агломератов активного металла показали важность учета динамики взаимодействия агломерата с поверхностью, неравновесных гетерогенных реакций окисления, обуславливающих появление двух областей «ожога» компонентами продуктов горения и диссоциации, а также парами атомарного алюминия осколков Al/Al_2O_3 , позволили выделить новый механизм уноса массы — химическое «выкрашивание» углерода

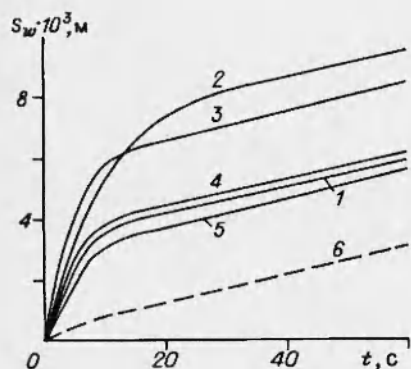


Рис. 2. Динамика поверхностного термохимического разрушения углепластикового ТЗМ (цифры у кривых соответствуют варианту расчета).

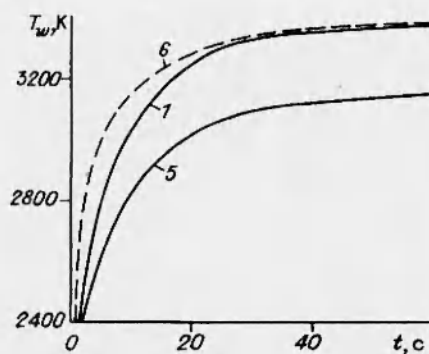


Рис. 3. Зависимость $T_w(t)$ (обозначения аналогичны рис. 2).

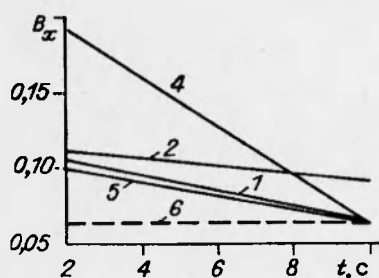
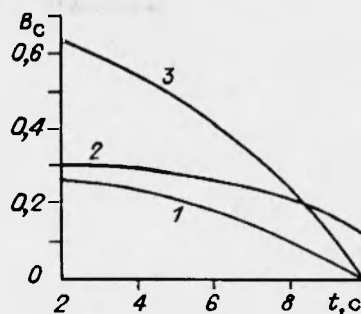
и новый возможный механизм образования мелкой фракции частиц оксида алюминия исключительно из-за сильного взаимодействия агломератов со стенкой.

По разработанной на основе [7] вычислительной программе АСМДРОР проводились параметрические численные расчеты нестационарного прогрева и термохимического разрушения типичного прессованного углепластикового ТЗМ в высокотемпературном двухфазном потоке при инерционном осаждении к-фазы жидких горящих агломератов алюминия. В варианте 1 использовались следующие основные входные данные: $p_e = 8,0$ МПа, $T_e = 3650$ К, $\rho_e u_e St_o = f_1(t)$, $\dot{m}_{a,w} = f_2(t)$, $\beta_{m,e} = f_3(t)$, $\alpha_{Al_2O_3} = 0$, $K_{Al,e} = 0$, $t_{oc} = 10$ с, $t_a = 60$ с, где p_e , T_e — давление и температура в ядре двухфазного потока; $\rho_e u_e St_o$ — коэффициент тепло- и массопереноса в холодную (неаблирующую) стенку; t_a — время процесса.

Считалось, что функции $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ линейно изменяются во времени в диапазоне $0 < t \leq t_{oc}$, а при $t > t_{oc}$ остаются постоянными; $(\rho_e u_e St_o)_{max} = 2,1$ кг/(м²·с), $(\rho_e u_e St_o)_{min} = 0,84$ кг/(м²·с), $(\dot{m}_{a,w})_{max} = 2$ кг/(м²·с), $(\dot{m}_{a,w})_{min} = 0$, $(\beta_{m,e})_{max} = 0,124$, $(\beta_{m,e})_{min} = 0,066$.

Результаты параметрических численных расчетов представлены ниже. По сравнению с вариантом 1 толщина унесенного слоя материала S_w (рис. 2) возрастает на 60% при увеличении времени t_{oc} до 20 с (рис. 2, 2), 40% в случае $(\dot{m}_{a,w})_{max} = 4$ кг/(м²·с) (рис. 2, 3); 4,5%, когда окислительный потенциал $(\beta_{m,e})_{max} = 0,248$ (рис. 2, 4), и уменьшается на 5,8% при $T_e = 3450$ К (рис. 2, 5). Отсюда следует, что важнейшими параметрами, определяющими зависимость $S_w = S_w(t)$, являются время инерционного осаждения агломератов алюминия и их массовый поток.

В этой связи точность расчета нестационарного прогрева и термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ в зоне инерционного осаждения к-фазы жидких горящих агломератов активного алюминия будет определяться совершенством газодинамических моделей двухфазных течений в энергоустановках. При $t > t_{oc}$ наблюдается выход на квазистационарный режим термохимического разрушения. Неучет химического воздействия осаждающихся инерционно агломератов алюминия и повышенного окислительного потенциала высокотемпературного двухфазного потока вызывает снижение толщины унесенного слоя углепластикового ТЗМ на 47% (вариант 6; $\dot{m}_{a,w} = 0$; $\beta_{m,e} = 0,066$) и, таким образом, может приводить к существенным погрешностям в определении потребной толщины вну-

Рис. 4. Зависимость $B_x(t)$.Рис. 5. Зависимость $B_C(t)$.

тренней разрушающейся теплозащиты. Глубина зоны термодеструкции, определяемой по положению изотермы 573 К, в момент окончания процесса δ_{573} (60 с) увеличивалась в вариантах 1–5 соответственно на 6,6, 15,4, 12,5, 6,65 и 3,5 % по сравнению с расчетом без учета влияния химического воздействия агломератов алюминия (вариант 6).

Изменение во времени температуры поверхности углепластикового ТЗМ в различных вариантах расчета представлено на рис. 3. Как видно, минимальный уровень температур имел место в варианте 5, а максимальный в варианте 6 при отсутствии химического воздействия жидких агломератов алюминия, когда термохимическое разрушение поверхностного слоя наименьшее. Зависимости $T_w = T_w(t)$ в вариантах расчета 2–4 находятся между кривыми 1 и 5.

Термохимическое разрушение углерода обугленного слоя углепластикового ТЗМ за счет неравновесных гетерогенных реакций окисления активными кислородсодержащими компонентами высокотемпературного двухфазного потока (H_2O , CO_2) происходит в диффузионном режиме. При вариантах расчета 1–5 изменение во времени безразмерного параметра вдува (проницаемости) $B_x = B_x(t)$, определяемого как $B_x = \dot{m}_x / \rho_e u_e St$, (\dot{m}_x — массовая скорость термохимического разрушения за счет неравновесных гетерогенных реакций окисления), имеет линейный характер с последующим выходом на квазистационарное значение $B_x \approx 0,0658$, когда $t > t_{oc}$ (рис. 4). Нелинейная зависимость от времени безразмерного параметра уноса $B_C = \dot{m}_C / \rho_e u_e St$, связанного с разрушением углерода обугленного слоя углепластикового ТЗМ по механизму химического «выкрашивания», демонстрируется на рис. 5. Данные по зависимости $B_C = B_C(t)$ в вариантах 4, 5 почти идентичны варианту 1. При $t > t_{oc}$ из условий задачи имеем $B_C = 0$.

Таким образом, проведенное параметрическое численное исследование показало, что неучет химического воздействия осаждающейся инерционно к-фазы жидких горящих агломератов активного алюминия из высокотемпературного двухфазного потока может приводить к существенным неточностям в определении термохимического разрушения углепластиковых ТЗМ многосоставных стенок, тем более значительным, чем больше время инерционного осаждения агломератов и их массовый поток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бураков В. А., Санду С. Ф. Термохимическое разрушение углепластиковых теплозащитных материалов в высокотемпературном двухфазном потоке // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 51–60.
2. Комплексное математическое моделирование взаимодействия высокотемпературных двухфазных потоков с углеграфитовыми теплозащитными матери-

- алами / В. А. Бураков, Н. А. Обухов, Р. К. Файзуллин и др. // Теплофизика высок. температур. 1992. Т. 30, № 5. С. 992-1001.
3. Казенин Д. А., Макеев А. А. Тепловое и динамическое взаимодействие при соударении капли с перегретой стенкой // Теор. основы хим. технологии. 1986. Т. 20, № 5. С. 653-659.
 4. Реакции углерода с газами. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
 5. Горение порошкообразных металлов в активных среда / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов и др. М.: Наука, 1972.
 6. Кожевников Г. Н., Водопьянов А. Г. Низшие окислы кремния и алюминия в электрометаллургии. М.: Наука, 1977.
 7. Бураков В. А., Санду С. Ф. Численное решение задач нестационарной теплопроводности и уноса теплозащитных материалов при осаждении частиц конденсированной фазы // Всесоюз. выст. прогр. комплексов по численному решению задач термомеханики. Тез. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1990. С. 10.

*Поступила в редакцию 2/VI 1994 г.,
в окончательном варианте — 11/X 1994 г.*
