

АНАЛОГИЧНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ РЕЗИНОПОДОБНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ И ЭРОЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРОХОВ

Г. В. Кузнецов

НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете, 634050 Томск

Экспериментально исследованы закономерности высокотемпературного разрушения типичного резиноподобного теплозащитного материала в потоке газов. Показана аналогичность процессов высокотемпературного разрушения теплозащитных материалов в газовых потоках и эрозионного горения порохов. Сформулирована новая гипотеза о механизме эрозионного горения порохов.

Эффект эрозионного горения порохов в большинстве теоретических моделей [1–4] объясняется интенсификацией процессов передачи тепла в пристенной области в результате турбулизации течения при увеличении скорости движения газового потока параллельно горячей поверхности. Для описания процесса эрозионного горения в [1] предложены обобщающие переменные: безразмерная скорость горения ϵ и параметр Виллюнова J . Параметр J отличается от параметра Победоносцева α , характеризующего «плотность заряжания», множителем $\sqrt{C_f}$ (C_f — коэффициент сопротивления трения), который уточняет влияние газового потока. Но эффект эрозионного горения в модели [1] также объясняется интенсификацией теплопередачи к поверхности горения.

В данной работе на основе анализа результатов экспериментальных исследований процесса высокотемпературного разрушения («абляции» по терминологии [5]) типичного резиноподобного неармированного эластичного теплозащитного материала при обтекании газовым потоком сформулирована физическая модель рассматриваемого процесса, выявлена аналогия между процессами эрозионного горения порохов и разрушения теплозащитного материала (ТЗМ) в газовых потоках, сформулирована новая гипотеза о механизме эрозионного горения.

Экспериментальные исследования проведены на установке и по методике, которые незначительно отличаются от описанных в [1]. Исследовался типичный резиноподобный эластичный ТЗМ, в состав которого входят следующие компоненты: фенолформальдегидная смола — 14,5%, бутадиеннитрильный кау-

чук — 57,6%, диатомит — 17,3%, технологические добавки. Образцы ТЗМ в форме цилиндра помещали в канал специального насадка. Поток высокотемпературных газов проходил в зазоре между стенками канала и образцом параллельно нагреваемой поверхности ТЗМ. Температура газов составляла ~ 2000 К. Давление (p) в насадке измерялось с помощью тензометрических датчиков. Продолжительность эксперимента определяли по осциллограммам давления. Образцы ТЗМ диаметром $12 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $60 \div 90$ мм до и после опытов измеряли с помощью малого инструментального микроскопа и взвешивали на аналитических весах. По результатам изменений находили среднюю за время эксперимента скорость уноса массы ТЗМ (\dot{m}). Продолжительность опыта определялась условиями минимизации погрешности эксперимента, обусловленной уменьшением диаметра образца и соответственно увеличением площади, свободной для прохода газов в насадке. По результатам измерений давления во время опыта, начального и конечного диаметров образцов, а также по данным о газоприходе в насадке рассчитывали скорость v газового потока, обтекающего образец. Для генерирования газового потока использовали состав, по своим характеристикам аналогичный описанному в [1].

Отличие использовавшейся методики от описанной в [1] состояло в следующем. Чтобы сохранить на образце ТЗМ кокс («обугленный слой»), образующийся при термическом разложении резиноподобных ТЗМ, по истечении заданной продолжительности эксперимента не проводился быстрый сброс давления за счет вскрытия дополнительного отверстия в камере

установки. Кроме того, в насадок с образцом ТЗМ не впрыскивалась вода, использовавшаяся в [1] для гашения образцов пороха.

Систематическая относительная погрешность определения основных измеряемых параметров (\dot{m} , p , v) не превышала $\pm 2,3\%$. Доверительный интервал для \dot{m} при доверительной вероятности 0,9 составлял $\pm 9,8\%$.

Результаты экспериментов в координатах (\dot{m} , v) при $p = 5, 10, 15$ МПа приведены на рис. 1. Каждая точка на рисунке соответствует среднему значению 5–6 опытов. На каждой кривой $\dot{m}(v)$ можно выделить два участка, характеризующие разными углами наклона кривой к оси абсцисс. Осмотр образцов после опытов показал, что при низких скоростях газового потока (первый участок) на поверхности ТЗМ сохраняется кокс. При скорости, большей определенного порогового значения (второй участок), кокса на поверхности образцов нет. Можно сделать вывод о том, что при достижении определенного значения скорости газового потока происходит смена механизмов высокотемпературного разрушения ТЗМ. При этом на втором участке опытные зависимости $\dot{m}(v)$ хорошо аппроксимируются прямыми линиями. Первый участок можно назвать областью термохимического разрушения, а второй — термомеханического разрушения.

Сопоставление полученных результатов с

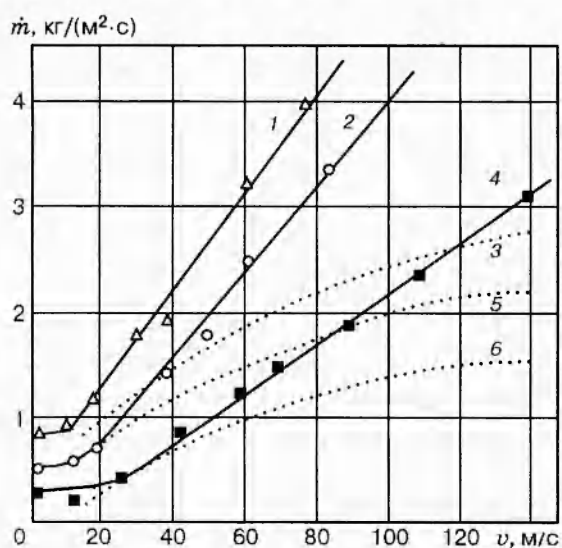


Рис. 1. Скорость уноса массы теплозащитного материала при различных давлениях:

$p = 15$ (1, 3), 10 (2, 5), 5 МПа (4, 6); 1, 2, 4 — эксперимент; 3, 5, 6 — расчет

известными экспериментальными данными по эрозионному горению порохов показывает, что зависимости $\dot{m}(v)$ имели вид [3], подобный приведенным на рис. 1. Данный вывод свидетельствует о возможности существования обобщенных зависимостей типа $\varepsilon = \varepsilon(J)$ между параметрами, характеризующими интенсивность разрушения ТЗМ, и параметрами газового потока.

Если в соответствии с [6] предположить, что скорость уноса массы резиноподобного ТЗМ определяется только количеством тепла, поступающего к нагреваемой поверхности, то по аналогии с общей теорией эрозионного горения [6] для анализа исследуемого процесса можно выбрать зависимость $\varepsilon = \varepsilon(J)$ или другую аналогичную зависимость [1–4].

При таком подходе возникает необходимость определить масштаб \dot{m}_0 . Выбрать, как это делается для порохов [1], в качестве масштабного значения \dot{m} при $v = 0$ нельзя. Результаты экспериментальных исследований показывают, что механизмы высокотемпературного разрушения резиноподобных ТЗМ при нулевой скорости и скорости, большей определенного порогового значения, существенно различаются. Поэтому в качестве масштабного выбрано значение \dot{m} в точке кривой $\dot{m}(v)$ на границе между областями термохимического и термомеханического разрушений, которое можно достаточно точно установить по результатам экспериментов.

На рис. 2 представлены результаты вы-

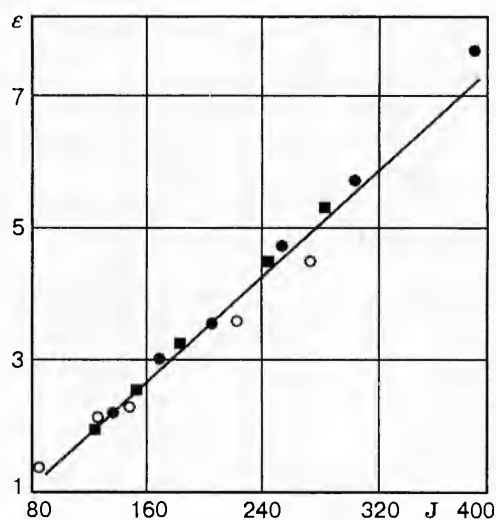


Рис. 2. Экспериментальные зависимости ε от J : p , МПа: ● — 5; ■ — 10; ○ — 15

полненных исследований в координатах (ε, J) . Параметр J в данном рассмотрении имеет вид $J = (\rho v / \dot{m}) \sqrt{C_f}$, где ρ — плотность газа. Видно, что зависимость $\varepsilon = \varepsilon(J)$ действительно является обобщенной для типичного ТЗМ. Независимо от значений p и v экспериментальные точки с разбросом не более $\pm 12\%$ располагаются вблизи одной прямой. Полученный результат подтверждает общность механизмов термомеханического разрушения резиноподобного ТЗМ и эрозионного горения порохов.

Необходимо отметить, что в соответствии с общей теорией ошибок [7] переход от размерных переменных к безразмерным увеличивает доверительный интервал полученных экспериментальных данных. В рассматриваемом случае несколько снижается, по сравнению с известными примерами [8], эффективность использования обобщенных переменных для анализа основных закономерностей исследуемых процессов.

Но экспериментально установленная формальная аналогичность термомеханического разрушения ТЗМ и эрозионного горения порохов не имеет адекватной теоретической базы. Поэтому выполнен численный анализ скорости уноса массы исследуемого материала с использованием хорошо известной и многократно апробированной модели [9]. В ее основу положено предположение о ведущей роли термического разложения материала в процессе уноса массы ТЗМ. Модель [9] также опирается на допущение о том, что скорость разрушения ТЗМ определяется количеством тепла, поступающего к нагреваемой поверхности материала.

В дополнение к вышеизложенному было принято во внимание, что весь кокс, образующийся при термическом разложении ТЗМ, мгновенно (как показали эксперименты) уносится с поверхности образца в диапазоне изменения параметров, соответствующем режиму, для которого установлена возможность использования обобщенных переменных ε и J . Тогда при допущении, что зона термического разложения имеет очень малые размеры по сравнению с толщиной образца и расположена вблизи нагреваемой поверхности, рассматриваемый процесс в рамках модели [9] можно описать следующей системой уравнений:

$$\dot{m} = \frac{(\rho_0 \lambda B R / E)^{0,5} T_{\text{п}} \exp(-E/2RT_{\text{п}})}{(c(T_{\text{п}} - T_0) + Q/2)^{0,5}},$$

$$(\alpha - \eta \dot{m} c_p)(T_r - T_{\text{п}}) = \dot{m}[c(T_{\text{п}} - T_0) + Q].$$

Здесь ρ_0 — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; E , B — энергия активации

и предэкспоненциальный множитель в аррениусовской зависимости скорости термического разложения ТЗМ от температуры: R — универсальная газовая постоянная; c — удельная теплоемкость; T_0 — начальная температура ТЗМ; $T_{\text{п}}$ — температура поверхности ТЗМ; Q — тепловой эффект реакции разложения; α — коэффициент теплоотдачи; η — коэффициент вдува; T_r — температура газового потока; c_p — теплоемкость газообразных продуктов разложения ТЗМ. Неизвестные \dot{m} и $T_{\text{п}}$ определяются методом последовательных приближений.

Значения α рассчитывали по известным параметрам газового потока с использованием эмпирической зависимости для турбулентного течения в трубах [10].

Расчеты проведены при следующих значениях основных параметров и характеристик материала: $\lambda = 0,22$ Вт/(м·К), $\rho_0 = 1160$ кг/м³, $c = 1440$ Дж/(кг·К), $Q = 2,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $E = 1,34 \cdot 10^5$ Дж/моль, $B = 1,5 \cdot 10^8$ л/с, $T_0 = 300$ К, $T_r = 2000$ К, $c_p = 1580$ Дж/(кг·К), $\eta = 0,6$.

Результаты расчетов приведены на рис. 1. Видно, что экспериментальные и расчетные значения скорости уноса массы удовлетворительно совпадают в области низких скоростей газового потока. С ростом скорости потока разность между экспериментальными и расчетными значениями скорости уноса массы увеличивается и достигает 80%. При этом расчетная кривая $\dot{m}(v)$ не является кривой первого порядка, в отличие от экспериментальной. Отсюда можно сделать вывод, что заложенный в модель [9] механизм влияния внешнего газового потока на процесс высокотемпературного разрушения ТЗМ соответствует реальному только в достаточно ограниченном диапазоне изменения параметров. При больших значениях v и p скорость уноса массы зависит, очевидно, не только от величины теплового потока к разрушающейся поверхности.

Установлено [11], что в условиях высоких касательных напряжений трения газового потока имеет место термомеханическое разрушение (иными словами, «механическая эрозия») резиноподобного ТЗМ, находящегося в размягченном состоянии. Материал в таком состоянии представляет собой смесь размягченного исходного ТЗМ с газообразными и конденсированными продуктами реакции термического разложения ТЗМ. В тонком приповерхностном слое, прогретом до высоких темпера-

тур (превышающих температуру начала разложения исходного полимера), исходные связи между компонентами частично нарушены, а новые, характерные для кокса при высоких температурах [12], еще не сформировались. Такая структура обладает низкой способностью противостоять газодинамическому воздействию внешнего потока [11]. При этом рост скорости газового потока приводит как к увеличению интенсивности теплоотдачи к поверхности ТЗМ, так и к росту напряжений трения газового потока. Последнее и вызывает термомеханическое разрушение тонкого слоя ТЗМ. Реакция термического разложения в этом слое не успевает завершиться, и газовый поток уносит не только кокс, представляющий собой конденсированные продукты этой реакции, но и материал, в котором процесс деструкции не закончился.

Способность частично деструктированного материала противостоять воздействию газового потока зависит от прочности сцепления между собой частиц кокса, исходного ТЗМ и «полуфабриката» (полимера с частью разорванных внутримолекулярных связей).

Если бы скорость разрушения ТЗМ определялась только величиной конвективного теплового потока к нагреваемой поверхности, то величина \dot{m} была бы пропорциональной $v^{0,8}$. Такая зависимость $\dot{m}(v)$ получается при расчете по модели [9] (см. рис. 1). В экспериментах же получена линейная зависимость $\dot{m}(v)$. Следовательно, скорость разрушения ТЗМ зависит и от напряжений трения газового потока. Таким образом, при достижении некоторой степени разложения прочность материала (σ) становится сопоставимой с уровнем сдвиговых напряжений внешнего газового потока (τ) и происходит отрыв слоя ТЗМ по координате, в которой выполняется условие $\sigma = \tau$. По мере роста τ уменьшается максимально достижимая в данных условиях степень разложения ТЗМ, соответственно увеличивается скорость уноса массы.

Аналогичность процессов высокотемпературного разрушения ТЗМ в газовых потоках, движущихся параллельно разрушающейся поверхности, и эрозионного горения порохов, установленная в экспериментах и формализованная в зависимостях $\varepsilon = \varepsilon(J)$, позволяет высказать предположения, уточняющие механизм эрозионного горения порохов.

Известно [13], что на поверхности горения порохов образуются плотные сажистые обра-

зования, между которыми имеются гладкие участки поверхности с лунками размерами до 25 мкм. Анализ структуры поверхности горения погашенных образцов баллиститного пороха и состава образований, определяемого с помощью сканирующего электронного микроскопа и рентгеновского микрозондового анализатора, показал [13], что каркас на поверхности горения пороха состоит в основном из углерода (93 ÷ 98 % объема). Высота и количество образований уменьшаются с ростом давления [13]. При $p = 3$ и 7 МПа высота образований составляет ≈ 30 и ≈ 10 мкм соответственно. В [13] предложена гипотеза механизма формирования сажистого каркаса. В ее основе лежит предположение о том, что из-за газодинамического взаимодействия периодически локально сбрасывается сажистый каркас. Одновременно с этим на других участках поверхности происходит рост сажистых образований. После выхода горения на стационарный режим структура поверхности горения практически не меняется. Авторы [13] на основе проведенного анализа высказывают предположение о том, что после воспламенения пороха некоторое время идет формирование сажистого каркаса, высота которого затем остается постоянной в среднем по всей поверхности горения.

Таким образом, и на поверхности разрушения резиноподобных ТЗМ, и на поверхности горения порохов в процессе интенсивного нагрева образуются слои, которые называют коксом [14] или сажистыми образованиями [13]. Эти слои играют значительную роль в регулировании интенсивности теплообмена внешней среды с ТЗМ [14] или порохом [13]. Наличие таких слоев, как правило, снижает величину теплового потока в зоны разложения ТЗМ и газификации порохов.

Кроме того, известно [15], что разогрев в волне горения для большинства твердых топлив сопровождается плавлением или размягчением (для аморфных веществ) их поверхностного слоя. Аналогичное размягчение наблюдается при высокотемпературном разрушении ТЗМ [11].

Итак, в механизмах поверхностных физико-химических превращений, протекающих при горении порохов и разрушении ТЗМ, есть много общего. На основании вышеизложенного можно сформулировать модель эрозионного горения порохов, основные положения которой заключаются в следующем.

1. Эрозионное горение порохов обусловле-

но не только увеличением суммарного теплового потока в зону реакции при повышении скорости газового потока, движущегося параллельно нагреваемой поверхности; причиной эрозионного горения является также рост газодинамических касательных напряжений трения τ при увеличении скорости движения продуктов сгорания пороха.

2. Рост τ приводит к разрушению и уносу сажистых образований с поверхности пороха. Последнее, в свою очередь, приводит и к повышению теплового потока в зону газификации, и к непосредственному росту скорости горения за счет уноса частиц сажи.

3. Дальнейшее увеличение τ приводит к термомеханическому разрушению тонкого размягченного (для аморфных веществ) или находящегося в состоянии расплава приповерхностного слоя пороха. Частицы или капли срываются с поверхности и газифицируются на некотором удалении от нее.

4. По мере увеличения напряжения трения газового потока растут глубина сдвиговых деформаций приповерхностного слоя пороха и соответственно скорость горения.

5. Термомеханическое разрушение приповерхностного слоя пороха увеличивает скорость горения и интенсифицирует теплообмен за счет дополнительной турбулизации потока частицами пороха, газифицирующимися уже в пристенной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вилюнов В. Н., Дворяшин А. А. О закономерностях горения пороха в потоке газа // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 1. С. 45–50.
2. Зельдович Я. Б. К теории горения пороха в потоке газов // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 4. С. 463–476.
3. Ванденкеркхове Д. Эрозионное горение коллоидальных твердых топлив // Вопросы ракет. техники. 1959. № 3. С. 70–78.
4. Зукроу М., Осборн Д., Мэрори Д. Экспериментальное исследование характеристик эрозионного горения смесевых твердых топлив // Ракет. техника и космонавтика. 1965. № 3. С. 190–193.
5. Адамс М. К. Последние достижения в теории абляции // Вопросы ракет. техники. 1960. № 4. С. 16–36.
6. Вилюнов В. И. К теории эрозионного горения порохов // Докл. АН СССР. 1960. Т. 136, № 2. С. 381–383.
7. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968.
8. Кутателадзе С. С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982.
9. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
10. Юдаев Б. Н. Теплопередача. М.: Высш. шк., 1981.
11. Кузнецов Г. В. Механизм высокотемпературного разрушения резиноподобных теплозащитных материалов в условиях высоких давлений // Материалы докл. междунар. школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». СПб., 1995. С. 56–59.
12. Термоустойчивость пластиков конструкционного назначения / Под ред. Е. Б. Тростянской. М.: Химия, 1980.
13. Денисюк А. П., Демидова Л. А., Галкин В. И. Ведущая зона горения баллиститных порохов с катализаторами // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 32–40.
14. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. М.: Машиностроение, 1976.
15. Гусаченко Л. К., Зарко В. Е., Зырянов В. Я., Бобрышев В. П. Моделирование процессов горения твердых топлив. Новосибирск: Наука, 1985.

Поступила в редакцию 29/VII 1996 г.