

суммарная скорость горения должна соответствовать кривой 1 (рис. 3). Если бы во фронте горения проходило образование только одного из соединений, например TiB или TiC (рис. 3, а), или TiB₂, TiC (рис. 3, б), то оставшийся компонент служил бы разбавителем и скорость горения должна быть близкой к значениям, полученным при разбавлении инертными разбавителями (см. рис. 3, 3, 4). То, что кривая изменения скорости горения для обеих систем (см. рис. 3, 2) проходит между теоретической кривой и кривыми для составов с разбавлением, свидетельствует о том, что все исходные компоненты участвуют в реакции и вносят вклад в общую скорость горения.

Поступила в редакцию
9/X 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, 204, 336.
2. С. Л. Григорян, А. Б. Авакян, И. П. Боровинская. Всесоюзная конференция «Процессы горения в химической технологии и металлургии». Тез. докл. Черноголовка, 1973.
3. Э. Стормс. Тугоплавкие карбиды. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1970.
4. Г. В. Самсонов и др. Физическое материаловедение карбидов. Киев, 1974.
5. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская и др. Синтез боридов в режиме горения. Отчет ИОХФ. 1974.
6. F. W. Glaser. J. Metals, 1952, 4, 391.

ПАРАМЕТРЫ ЗОН ГОРЕНИЯ ПОРОХА, ПОГАСАЮЩЕГО НА ПОДЛОЖКЕ

А. А. Зенин, О. И. Лейпунский, В. М. Пучков

(Москва)

Гашение пороха на массивном теплопроводном плоском теле (подложке) — один из видов нестационарного горения пороха. Погасание пороха в этих условиях происходит вследствие теплотерь в конденсированную фазу (к-фазу) в направлении распространения фронта горения. Исследование этого процесса представляет определенный теоретический и методический интерес. Метод гашения на подложке предложен и предварительно исследован в работах [1—5], где даны формулы для оценок изменения скорости горения при подходе к подложке и оценены толщины остатка пороха, а также экспериментально найдены толщины остатков на подложке при разных внешних условиях.

Метод гашения на подложке может быть использован для проверки моделей горения и погасания пороха. Цель настоящей работы — получение параметров зон горения пороха непосредственно перед погасанием на подложке и проверка существующих представлений о механизме погасания. Эта работа продолжает исследования, предпринятые с целью выяснения механизма гашения пороха [6].

Для получения параметров зон и скорости горения пороха перед погасанием использовались микротермопарная методика [7] и методика получения микрорельефа погасших поверхностей [6, 8]. Опыты проводились на баллиститном порохе Н, параметры зон горения которого хорошо известны [7, 9, 11]. Преимущество метода подложки по сравнению с другими методами гашения (например, на критическом диаметре [6])

Таблица 1

p , атм	\bar{h}_c	\bar{h}_m	l	$\bar{h}_э$	\bar{h}_p
5	30	85	80	123	63
10	30	60	60	77	42
20	25	35	35	52	26
40	12	22	25	33	17
60	10	20	20	25	13

Примечание. \bar{h}_m , \bar{h}_c , l , $\bar{h}_э$ и \bar{h}_p измерялись в мкм.

состоит в заранее известном положении поверхности гашения пороха. Это позволяет заклеивать термопару в нужных местах остановленной волной горения и получать в них изменение температуры до и после гашения. Использовались подложки из стали, меди, дюрала и стекла. Исследовалось также влияние инерционных сил на толщину остатка.

Основные исследования проведены при давлениях 5, 10, 20, 40 и 60 атм и начальной температуре $T_0=20^\circ\text{C}$. Значения толщины погасшего пороха (средние из 10—20 измерений срезов под микроскопом) на подложке из меди (\bar{h}_m) и стекла (\bar{h}_c) в зависимости от давления приведены в табл. 1. Здесь же приведены данные работы [1] ($\bar{h}_э$ — эксперимент, \bar{h}_p — расчет, материал подложки — медь) и значения толщины теплового слоя к-фазы (l) в стационарном режиме горения. Видно, что \bar{h}_m и l практически совпадают и заключены между $\bar{h}_э$ и \bar{h}_p , а \bar{h}_c примерно в 2 раза меньше \bar{h}_m . Не замечено отличия в значениях толщин остатка пороха (в пределах разброса $\sim \pm 10-15\%$) на подложках из меди, стали и дюрала.

Микрорельеф погасшей поверхности имеет гладкий вид, размеры неоднородностей к-фазы малы по сравнению с l . На поверхности находится легкая сетка углеродистых нитей, состоящих из скрепленных в цепочку угольных дисков диаметром 30—100 и толщиной ~ 10 мкм. Эксперименты в поле инерционных сил на установке, описанной в [12] (ускорение 400 g), показали, что прижимающее ускорение уменьшает \bar{h}_m на 25%, а отжимающее — увеличивает его на 15%. Эти результаты объясняются увеличением (уменьшением) скорости горения [13] при перегрузках, что приводит к уменьшению (увеличению) толщины теплового слоя l .

Типичные осциллограммы температурных записей в волне горения термопарами, которые находились в момент гашения под поверхностью пороха и над поверхностью в газовой фазе, приведены на рис. 1, а, б соответственно. Видно, что характер кривых плавный, при гашении не возникают колебания (как при гашении на критическом диаметре [6]), по записям можно установить момент гашения. Характер кривых не зависит от материала подложки. Как и в работе [6], по записям температуры и расстоянию между термоспаем и погасшей поверхностью может быть полу-

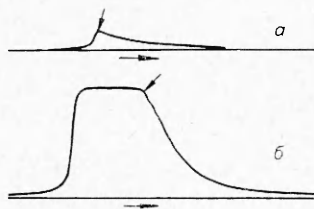


Рис. 1. Осциллограммы температурных записей при погашении пороха Н на медной подложке ($p=5$ атм, $T_0=20^\circ\text{C}$). Стрелкой указан момент гашения.

Характер кривых не зависит от материала подложки. Как и в работе [6], по записям температуры и расстоянию между термоспаем и погасшей поверхностью может быть полу-



Рис. 2. Осциллограмма записи температуры поверхности методом грузовиков при подходе поверхности горения пороха Н к медной подложке.

Т а б л и ц а 2

p, атм	u, мм/с (T ₀ =20°C)	u _{кр} , мм/с	u, мм/с, (T ₀ =140°C)	T _п , °С	T _{п. кр} , °С	φ _к * · 10 ⁻⁵ , град/см	φ _к · 10 ⁻⁵ , град/см	
							T ₀ =20°C	T ₀ =140°C
5	1,5	1,4	4,4	260	260 ± 10	0,9	0,3	1,0
10	1,9	2,0	5,5	300	290 ± 10	1,2	0,5	1,4
20	3,4	3,2	7,6	335	320 ± 20	2,4	0,9	2,0
40	6,0	5,9	11,1	390	380 ± 40	3,5	2,0	3,4

чена скорость горения перед погасанием ($u_{кр}$). В табл. 2 приведены средние значения $u_{кр}$, полученные на базах от ~ 100 до ~ 500 мкм, и стационарные значения скорости горения при соответствующих давлениях. Видно, что $u_{кр} \approx u$ в пределах разброса значений $u_{кр}$ ($\pm 10\%$).

Типичная осциллограмма записи температуры поверхности при подходе к подложке методом следящей термопары приведена на рис. 2. Измерения критического значения $T_{п. кр}$ особенно интересны, так как в этих опытах можно проверить правильность прилегания термоспая к поверхности в момент гашения. В табл. 2 приведены значения $T_{п. кр}$ и $T_{п}$ в стационарных режимах горения. Видно, что в пределах обычного разброса для этой величины ($\pm 30^\circ$) получено $T_{п} \approx T_{п. кр}$.

Градиенты температуры в к-фазе у поверхности непосредственно перед погасанием (ϕ_k^*) получены по температурным записям термопар, оставшихся в к-фазе после гашения. Расстояние между поверхностью и термоспаем измеряется под микроскопом, разность температур поверхности и температуры в месте спая определяется из осциллографической записи, что и позволяет найти ϕ_k^* . Максимальные значения этих градиентов приведены в табл. 2, где также даны значения градиентов температуры ϕ_k , полученные в стационарных режимах при тех же давлениях и начальных температурах 20 и 140°C (значения ϕ_k см. [10]). Видно, что ϕ_k^* всегда больше стационарного значения ϕ_k (для $T_0 = 20^\circ\text{C}$) примерно в два раза; ϕ_k^* близки к ϕ_k при $T_0 = 140^\circ\text{C}$.

Выше получено, что при гашении пороха Н на металлической (медной, стальной, дюралевой) подложке: 1) толщина оставшегося слоя к-фазы близка к толщине теплового слоя при стационарном режиме горения; 2) в пределах экспериментального разброса не замечено существенного изменения скорости горения и температуры поверхности перед погасанием; 3) обнаружено примерно двукратное увеличение градиентов температуры в к-фазе перед погасанием. Первый вывод соответствует измерениям этой величины и ее теоретическим оценкам в работах [1, 4]. Второй вывод новый. В работе [4] указывается, что для модели пороха с постоянной величиной $T_{п}$ скорость горения при подходе фронта к подложке должна уменьшаться, а для модели пороха с переменной $T_{п}$ (т. е. пороха Н) скорость горения должна расти. Для модели вещества с плавно изменяющейся плотностью во фронте горения [14, 15] скорость горения у подложки должна уменьшаться [5].

В квазистационарном приближении и при узкой зоне реакции в реакционном слое к-фазы $T_{п}$ однозначно связана со скоростью горения [16]. Если справедливы предположения квазистационарности и узкого реакционного слоя, то при подходе к подложке $T_{п}$ должна изменяться аналогично скорости горения. Особенность настоящей работы состоит в достаточно четком определении $T_{п. кр}$. Значения критической скорости получены менее надежно вследствие большого расстояния (базы), на котором она изменяется (100 ÷ 500 мкм): оценки изменения $u_{кр}$ по фор-

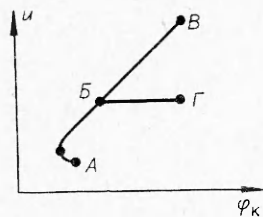


Рис. 3. Качественная зависимость скорости горения баллиститного пороха от градиента температуры в к-фазе у поверхности.

мулам работы [4] показывают, что скорость горения заметно изменяется лишь на базах $\sim l$. Впрочем, при $p=5$ атм $l \approx 80$ мкм, т. е. близка к минимальной базе в наших измерениях (100 мкм). Таким образом, по крайней мере для низких давлений слабое отличие $u_{кр}$ от u установлено.

На рис. 3 представлен график, показывающий качественный ход изменения скорости горения в зависимости от φ_k в квазистационарном приближении и узкой зоне химических реакций в к-фазе (кривая А—В) и изменения параметров u и φ_k при погасании пороха Н на подложке (прямая В—Г) по данным наших измерений (для начального режима В).

Полученное расхождение показывает необходимость учета реальной кинетики реакции в к-фазе при анализе погасания пороха на подложке.

Авторы благодарят Б. В. Новожилова за дискуссию, А. Д. Марголина и В. Г. Крупкина — за предоставление установки для исследования горения в поле ускорений, В. И. Домбровского — за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
13/XII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР 1968, 180, 6, 1391.
2. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1968, 4, 79.
3. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1969, 2, 93.
4. О. И. Нефедова, С. С. Новиков и др. ПМТФ, 1970, 2, 85.
5. В. С. Берман, С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1972, 1, 23.
6. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский и др. ФГВ, 1976, 12, 2, 179.
7. А. А. Зенин. Канд. дис. М., ИХФ АН СССР 1962.
8. Ю. С. Шмоткин. Дипломная работа. М., ИХФ АН СССР — МТФИ, 1975.
9. А. А. Зенин, О. И. Лейпунский. ФГВ, 1967, 3, 1, 45.
10. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
11. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М. «Наука», 1975.
12. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. ФГВ, 1975, 11, 5, 702.
13. В. И. Юхвид, Э. И. Максимов и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 28.
14. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1964, 157, 2, 412.
15. Э. И. Максимов, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1966, 2, 1, 47.
16. А. А. Зенин, Б. В. Новожилов. ФГВ, 1973, 9, 2, 246.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАМЕНИ КОАКСИАЛЬНОЙ ГОРЕЛКИ МЕТОДАМИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

А. Е. Давыдов, В. С. Аbruков, С. А. Аbruков,
Н. А. Тарасов, Ф. Т. Денисов

(Чебоксары)

Система коаксиальной горелки представляет собой модель реальной камеры релаксационного вибрационного горения. К данному типу горения можно отнести процессы, происходящие в выхлопной трубке [1], в банке Рейнета [2], в топочных устройствах [3], в кольцевой ка-