

## ГОРЕНИЕ ПЛАСТИН ТИТАНА

Н. Н. Бахман, Г. П. Кузнецов, В. М. Пучков

Институт химической физики РАН, 117977 Москва

Определен нижний предел горения по давлению пластин титанового сплава ОТ-4 в среде  $O_2 - Ar$ . Значения нижнего предела монотонно уменьшаются по мере увеличения концентрации кислорода в смесях  $O_2 - Ar$  и растут с увеличением толщины образца. Определена скорость распространения горения по поверхности указанных образцов в смеси 75 %  $O_2 + 25$  %  $Ar$  при давлении  $\leq 3,1$  МПа. Показано, что для титана зависимость скорости горения от толщины образца существенно слабее, а от давления, напротив, существенно сильнее, чем аналогичные зависимости для цилиндрических образцов из мягкой стали, приведенные в литературе.

В работе [1] было показано, что при горении прессованных образцов из титана в среде  $O_2 - Ar$  при давлении  $p = 0,1$  МПа существует верхний предел горения по плотности образца ( $\rho_u$ ) такой, что при  $\rho > \rho_u$  устойчивого горения не наблюдается. Существование предела  $\rho_u$  объяснялось 1) увеличением теплопроводности образца по мере роста  $\rho$  и соответствующим увеличением теплоотвода в толщу образца; 2) уменьшением пористости образца и соответствующим уменьшением толщины реагирующего слоя металла, а следовательно, и уменьшением скорости тепловыделения на единице площади поверхности образца. В настоящей работе проведены опыты с монолитными пластинами титана ( $\rho = \text{const} \simeq 4,5$  г/см<sup>3</sup>). Исходя из результатов работы [1] заранее было очевидно, что такие образцы могут гореть в смесях  $O_2 - Ar$  (при отсутствии обдува) лишь при повышенном давлении. Действительно, изученные в [1] образцы уже при плотности  $\rho = 3,33$  г/см<sup>3</sup> не горели в смеси с концентрацией кислорода  $C_{O_2} = 75$  % (и тем более при  $C_{O_2} < 75$  %). Следовательно, в качестве одного из критических условий горения здесь можно рассматривать минимальное давление ( $p_l$ ) смеси  $O_2 - Ar$ , при котором горение образцов становится устойчивым. Определению  $p_l$  посвящена первая часть настоящей работы, а вторая — измерению скорости горения ( $w$ ) указанных образцов.

Нужно отметить, что для большинства металлов процесс диффузионного горения плоских образцов изучен существенно меньше, чем горение цилиндрических образцов. Сплавы титана в этом отношении являются исключением: результаты для плоских образцов содер-

жатся в работах [2–5], в то время как данные, относящиеся к цилиндрическим образцам (проволокам), даны лишь в работе [6]. Однако значения  $p_l$  для фольги из сплава ВТ-1-0 в среде  $O_2 - N_2$  (ориентация образцов не указана) даны лишь в работе [2]. Толщина образцов, горящих в смеси 45 %  $O_2 + 55$  %  $N_2$  равна  $\Delta = 0,1; 0,2; 0,5$  мм при  $p_l < 0,1$  МПа и  $p_l = 0,15, 0,45$  МПа соответственно. При более высокой концентрации кислорода (70 и 100 %) для  $p_l$  дана только оценка сверху:  $p_l < 0,1$  МПа. В работах [3–5] определены минимальная скорость ( $v_l$ ) обдува плоских образцов из титановых сплавов потоком воздуха или смесей  $O_2 - N_2$ , начиная с которой становится возможным устойчивое горение, и зависимость  $w(v)$  при различной ориентации образцов относительно набегающего потока газообразного окислителя. Все данные в [3–5] получены при атмосферном давлении; размеры образцов — толщина  $\Delta = 0,8 \div 1,0$  мм, ширина  $b = 5$  мм, длина  $l = 60$  мм.

## 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Опыты проводили с пластинами титанового сплава ОТ-4 (содержащего 0,2 ÷ 2,0 %  $Mn$  и 3,5 ÷ 5 %  $Al$ ). Размеры образцов —  $\Delta = 0,55$  и 1,2 мм,  $b = 10$  мм,  $l = 35 \div 36$  мм. Один из концов образца (длиной 5 мм) представлял собой остроконечный клин (рис. 1). С этого конца осуществлялось поджигание образца с помощью вольфрамовой спирали либо спрессованной (в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами  $1 \times 1 \times 10$  мм) навески стехиометрической смеси  $Ti + C$ , которая, в свою очередь, поджигалась нихромовой спиралью. Второй конец образца зажимался в разрезной ас-

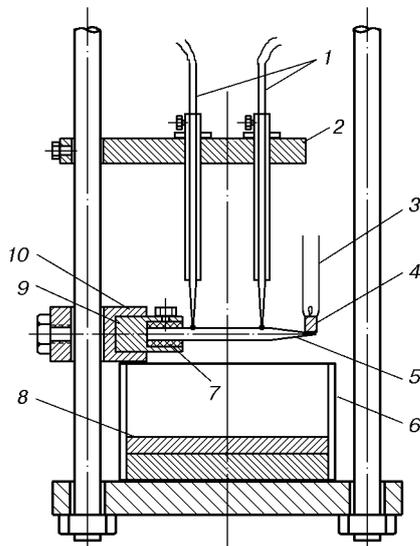


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — термопары; 2 — узел крепления термопар; 3 — спираль поджога; 4 — воспламенитель; 5 — исследуемый образец; 6 — кварцевый цилиндр; 7 — прокладка из слюды; 8 — асбестовая подложка; 9 — асбестовая втулка; 10 — держатель

бестовой втулке через прокладки из слюды. Втулка крепилась в держателе, который позволял устанавливать исследуемый образец в любое из трех взаимно перпендикулярных положений. Так как воспламенение образца сопровождалось разбросом мелких фрагментов перегоревшей спирали, а горение исследуемых образцов — образованием крупных горящих капель расплавленного титана (особенно при высоких значениях  $p$  и  $C_{O_2}$ ), были приняты меры для предотвращения нежелательного воспламенения деталей установки:

- 1) провода, подводящие напряжение к спирали, помещали в керамические трубки (на рис. 1 не показаны);
- 2) смотровое окно бомбы постоянного объема БПО-2 (выполненное из плексигласа) было защищено изнутри сменным термостойким стеклом;
- 3) под горящим образцом устанавливали кварцевый стакан; капли расплавленного титана улавливались на асбестовую подложку на дне стакана, а разлетающиеся при их горении мелкие капли улавливались стенками стакана.

Все опыты проводили в заранее приготовленных смесях  $O_2 - Ar$ . Для поддержания по-

стоянного состава среды внутри бомбы в ходе горения применялся непрерывный поток свежей газовой смеси (с объемным расходом 1,5 л/с). Давление в бомбе контролировалось образцовым манометром.

Скорость горения измеряли с помощью двух хромель-алюмелевых термопар (диаметр проволок 0,2 мм) (см. рис. 1). Специальным устройством термопары прижимались к поверхности образца на его осевой линии. Первая термопара находилась на расстоянии  $\approx 15$  мм от остроконечного конца образца, а вторая — на расстоянии  $15 \div 16$  мм от первой термопары. Сигнал термопар поступал на вход усилителя постоянного тока Ф-023 и затем регистрировался шлейфовым осциллографом Н-117/1. Скорость распространения волны горения по поверхности образца определялась как  $w = L/\tau$ , где  $L$  — расстояние между термопарами, а  $\tau$  — разность между временами достижения первой и второй термопарами одинаковой температуры  $\approx 1300$  °С.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

**2.1. Нижний предел горения образцов по давлению.** В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты опытов по определению нижнего предела горения образцов из титанового сплава ОТ-4  $\Delta = 0,55$  мм по давлению газообразного окислителя  $O_2 - Ar$ . В табл. 1  $p_-$  — максимальное давление, при котором образец затухает сразу после поджигания;  $p_+$  — минимальное давление, при котором образец полностью сгорает;  $p_l = (p_- + p_+)/2$ . Угол  $\varphi$  указывает ориен-

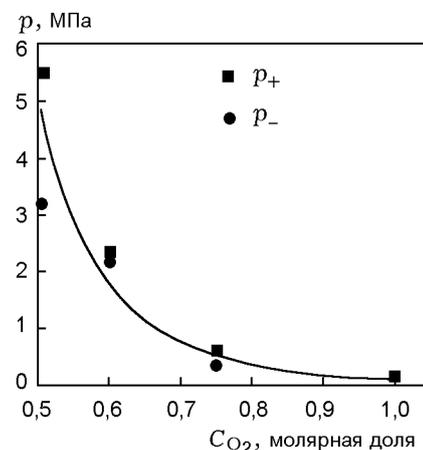
Рис. 2. Зависимость  $p_l(C_{O_2})$  при  $\varphi = 0$

Таблица 1

Состав окислителя	$\varphi = -90^\circ$			$\varphi = 0$			$\varphi = +90^\circ$		
	$p_-$	$p_+$	$p_l$	$p_-$	$p_+$	$p_l$	$p_-$	$p_+$	$p_l$
	МПа			МПа			МПа		
20 % O <sub>2</sub> + 80 % Ar	2,5	—	—	6,0	—	> 6,0	2,6	—	—
50 % O <sub>2</sub> + 50 % Ar	3,2	5,5	4,35	3,2	5,5	4,35	3,2	—	—
60 % O <sub>2</sub> + 40 % Ar	2,2	2,3	2,25	2,2	2,3	2,25	2,2	2,3	2,25
75 % O <sub>2</sub> + 25 % Ar	0,35	0,60	0,475	0,35	0,60	0,475	0,35	0,60	0,475
100 % O <sub>2</sub>	—	≤ 0,1	≤ 0,1	—	≤ 0,1	≤ 0,1	—	≤ 0,1	≤ 0,1

тацию образцов и направление горения: значение  $\varphi = 0$  соответствует горизонтальным образцам,  $\varphi = \pm 90^\circ$  — вертикальным образцам, при этом  $\varphi = +90^\circ$  относится к горению снизу вверх, а  $\varphi = -90^\circ$  — к горению сверху вниз.

Как видно из табл. 1, значение  $p_l$  монотонно уменьшается по мере увеличения концентрации кислорода в смеси O<sub>2</sub> – Ar. Данный результат закономерен для диффузионного горения, так как скорость подвода кислорода к зоне реакции (а следовательно, и скорость тепловыделения в зоне реакции) пропорциональна концентрации кислорода в окружающей среде. Для плоских образцов толщиной 1,2 мм опыты проводили только в смеси 75 % O<sub>2</sub> + 25 % Ar. Получено, что  $p_- = 0,6$  МПа,  $p_+ = 1,1$  МПа и соответственно  $p_l = 0,85$  МПа. Это в 1,8 раза больше, чем для образца толщиной 0,55 мм. Рост  $p_l$  при увеличении толщины образца согласуется с приведенными выше данными работы [2] для фольги из титанового сплава ВТ-1-0, горячей в смеси 45 % O<sub>2</sub> + 55 % N<sub>2</sub>. На рис. 2 нанесены экспериментальные точки из табл. 1 для  $p_+$  и  $p_-$  (при  $\varphi = 0$ ). Зависимость  $p_l(C_{O_2})$  может быть аппроксимирована степенной функцией

$$p_l = A_1(C_{O_2})^{-m}. \quad (1)$$

При  $\varphi = 0$  методом наименьших квадратов получено  $A_1 = 0,1017$  и  $m = 5,573$  (при этом размерность  $p_l$  — МПа, а  $C_{O_2}$  — молярная доля).

Существенной зависимости  $p_l$  от ориентации образца и направления горения обнаружено не было. Следует отметить, что в литературе отсутствуют какие-либо данные о зависимости  $p_l(\varphi)$  для титана. Что касается других металлов, то приведенные в [2] данные противоречивы. Так, для стали X18H9T отношение  $(p_l)_{+90^\circ}/(p_l)_0$  быстро убывает при увеличении

диаметра образца (от 55 при  $d = 1$  мм до 1,0 при  $d = 5$  мм). Напротив, для медистого чугуна при увеличении диаметра от 3 до 4,5 мм отношение возрастает от 1,0 до 2,5. Можно предположить, что вид функции  $p_l(\varphi)$  существенно зависит от свойств металла, в том числе от соотношения между температурой его плавления и температурой горения (последняя, в свою очередь, сильно зависит от состава окислительной среды).

**2.2. Скорость горения образцов.** Из теории диффузионного горения известно, что скорость распространения пламени по поверхности образцов твердых неорганических и органических горючих убывает по мере увеличения (в определенном диапазоне) диаметра или толщины образца. При этом в интервале  $d \approx 0,5 \div 10$  мм характер зависимостей  $w(d)$  для металлов и органических полимеров примерно одинаков. Однако при  $d$  (или  $\Delta$ )  $> 15 \div 20$  мм значение  $w$  для органических полимеров вообще перестает изменяться по мере дальнейшего увеличения  $d$  или  $\Delta$  (см. [7]). Для металлов подобное явление пока не наблюдалось. Возможно, что для металлов существует верхний предел горения по диаметру (или толщине) образца, при котором горение затухает из-за чрезмерного теплоотвода в толщу образца.

Перейдем непосредственно к результатам,

Таблица 2

$p$ , МПа	$w$ , мм/с	
	$\Delta = 0,55$ мм	$\Delta = 1,2$ мм
0,6	2,8	—
1,1	5,0	3,4
1,6	9,0	6,7
3,1	12,3	11,1

Таблица 3

$p_{O_2}$ , МПа	$d$ , мм	$n$	Источник
0,3	1–3	1,1	[8]
5,0	1–10	0,83	
10,0		0,84	
1,8	1–3	0,78	[9]
4,4		0,68	
6,4		0,68	
7,8		0,70	

полученным в настоящей работе. В табл. 2 приведены средние арифметические (по 2–3 опытам) значения\* скорости горения плоских горизонтальных образцов из титанового сплава ОТ-4 толщиной  $\Delta = 0,55$  и 1,2 мм в смеси 75%  $O_2 + 25\%$  Ar. Видно, что скорость горения убывает при увеличении толщины образца.

В теории диффузионного горения зависимость  $w(d)$  (или  $w(\Delta)$ ) принято аппроксимировать степенной функцией:

$$w = A_2/d^n \quad \text{или} \quad w = A_2/\Delta^n, \quad (2)$$

где  $A_2 = \text{const}$  не зависит от толщины образца. Исходя из данных табл. 2 значения показателя степени  $n$ , рассчитанные по двум точкам ( $\Delta = 0,55$  и 1,2 мм), равны 0,49; 0,38; 0,13 при  $p = 1,1; 1,6; 3,1$  МПа соответственно. Таким образом, в данном случае зависимость  $w(\Delta)$  быстро ослабевает по мере роста давления.

Экспериментальные исследования зависимости  $w(\Delta)$  для плоских образцов металлов вообще не проводились, а соответствующие данные для цилиндрических образцов сравнительно скудны. Значения  $n$  для вертикальных стержней из мягкой стали, горящих снизу вверх ( $\varphi = +90^\circ$ ), даны в табл. 3. Значения  $n$ , а также  $\nu$  (о них речь пойдет ниже) рассчитаны авторами настоящей работы по экспериментальным точкам, приведенным в работах [2, 6, 8, 9]. Значения  $n$  в табл. 3 существенно выше (а снижение величины  $n$  по мере роста давления существенно слабее), чем для пластин из сплава ОТ-4, изучаемых в настоящей работе. Данные для проволок из титана ( $d = 0,5$  мм) и циркония ( $d = 0,5$  мм и  $d = 1,0$  мм) [6], горящих (по-видимому, при

\*Отклонение значений  $w$  от средних арифметических не превышало  $6 \div 8\%$ .

Таблица 4

$C_{O_2}$ , молярная доля	$n_{Ti}$	$n_{Zr}$
0,5	—	1,20
0,6	1,21	1,30
0,7	1,42	—
0,8	1,30	0,98
0,9	1,07	0,74
1,0	0,52	0,91

$\varphi = +90^\circ$ ) в смеси  $O_2-N_2$  при  $p = 0,1$  МПа, приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что при  $C_{O_2} > 0,6 \div 0,7$  значение  $n$  быстро убывает по мере увеличения концентрации кислорода. Однако трудно сравнивать абсолютные величины  $n$  в табл. 4 со значениями  $n$  из табл. 3, а также с теми, что получены в настоящей работе, так как первые получены при  $p = 0,1$  МПа, а вторые и третьи относятся к диапазонам давления  $0,3 \div 10$  МПа и  $1,1 \div 3,1$  МПа соответственно.

Рассмотрим зависимость  $w(p)$ . В теории горения зависимость  $w(p)$  обычно аппроксимируют функцией

$$w = A_3 p^\nu, \quad (3)$$

где  $A_3 = \text{const} \neq f(p)$ . Исходя из данных табл. 2 были рассчитаны значения показателя степени  $\nu$  для изучаемых в настоящей работе образцов толщиной 0,55 мм (при  $p = 0,6 \div 3,1$  МПа) и 1,2 мм (при  $p = 1,1 \div 3,1$  МПа):  $\nu = 0,98$  и 1,14 соответственно. Видно, что показатель  $\nu$  увеличивается с ростом толщины образца, в то время как показатель  $n$  быстро падает с ростом давления (см. выше). Зависимости  $\nu(\Delta)$  и  $n(p)$  связаны между собой:

$$\frac{\partial n}{\partial p} = -\frac{\Delta}{p} \frac{\partial \nu}{\partial \Delta}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что если  $\nu$  растет с увеличением толщины образца (т. е.  $dv/d\Delta > 0$ ), то величина  $n$  должна падать с ростом давления (т. е.  $dn/dp < 0$ ), что согласуется с приведенными выше данными для образцов из сплава ОТ-4.

Опубликованных данных по зависимости  $w(p)$  для плоских образцов металлов вообще нет, а для цилиндрических образцов они немногочисленны (так же, как для зависимости  $w(\Delta)$  или  $w(d)$ ). В табл. 5 приведены данные по зависимости  $w(p)$  для цилиндрических

Таблица 5

$\varphi$ , град	$d$ , мм	$p_{O_2}$ , МПа	$\nu$	Источник
0	3	0,4–1,6	0,57	[2]
0	3	1–39	0,59	
90	1	0,3–10	0,28	[8]
90	2		0,33	
90	3		0,40	
90	1	1,8–7,8	0,32	[9]
90	2		0,39	
90	3		0,41	

образцов из мягкой стали, горящих в чистом кислороде. Видно, что показатель степени  $\nu$  заметно возрастает с ростом диаметра образца. Это согласуется с результатами нашей работы (см. выше). Однако в настоящей работе для образцов с  $\Delta = 1,2$  мм показатель  $\nu$  в 3,5–4 раза выше, чем для образцов из мягкой стали при  $d = 1$  мм. Отметим также, что увеличение  $\nu$  с ростом  $d$  (см. табл. 5) и уменьшение  $n$  с ростом  $p$  (см. табл. 3) находятся в согласии с формулой (4).

Необходимо отметить также, что в [10] описана весьма парадоксальная форма кривых  $w(p)$  для алюминия и алюминиевых сплавов АМц и АМг. Для этих материалов по мере увеличения  $p_{O_2}$  значение  $w$  сначала растет ( $\nu > 0$ ), потом проходит через максимум и начинает падать ( $\nu < 0$ ), затем вновь растет. Подобная форма кривой  $u(p)$  ( $u$  — нормальная скорость горения) нередко наблюдается для некоторых взрывчатых веществ, например пикрата калия [11], но совершенно не характерна для диффузионного горения твердых горючих. Причины такого поведения кривых  $w(p)$  в работе [10] не рассматривались.

В заключение отметим, что закономерности горения металлов могут существенно зависеть от соотношения между температурой горения металла ( $T_b$ ) и температурой его плавления ( $T_m$ ). В случае  $T_m < T_b$  возможны два режима горения (в зависимости от ориентации образца, направления горения и скорости обдува образца потоком газообразного окислителя): 1) образование горячей капли расплава, ее рост, отрыв и падение, повторное образование капли и т. д.; 2) течение по поверхности образца совокупности капель или пленки расплава с возможностью последующего срыва капель и

фрагментов пленки.

Первый из этих двух режимов описан в работах [8–10]. В [10] отмечено, что при горении сплавов АМц и АМг-6 скорость горения уменьшается в момент отрыва капли и увеличивается в процессе роста капли. В [9] при горении снизу вверх железных стержней ( $d = 3,2$  мм) при  $p_{O_2} = 6,9$  МПа время цикла «рост капли — отрыв капли» составляло  $\approx 0,45$  с. В [8] отмечалась периодичность отрыва капель при горении стержней из мягкой стали, а также флуктуации величины  $w$ , однако средняя скорость пламени на достаточно длинном участке оставалась постоянной. В настоящей работе при горении плоских горизонтальных образцов из титанового сплава ОТ-4 (длиной 35 мм) наблюдались образование, рост и последующее падение 2–3 капель диаметром  $3 \div 5$  мм. Капли догорали на асбестовой подложке.

Что касается второго режима, то условия течения пленки расплавленного металла могут совершенно по-разному влиять на скорость горения. Так, согласно [9] при  $\varphi = -90^\circ$  стекающий расплав металла охлаждается на поверхности свежего образца, полного сгорания металла не происходит, и горение становится неустойчивым. Напротив, в [8] при горении стержней из мягкой стали при  $\varphi = -90^\circ$  и достаточно высоких значениях  $p_{O_2}$  стекающий расплав эффективно прогревал свежий образец и скорость процесса резко возрастала.

Течение пленок или капель расплава по поверхности свежего образца одинаково влияет на скорость горения как металлов, так и органических полимеров. Так, в работе [12] была исследована скорость горения покрытий из полиметилметакрилата (ПММА) и полиэтилена (ПЭ) на медных проволоках (в покоящемся воздухе при  $20^\circ\text{C}$ ). Существенного плавления покрытий из ПММА не наблюдалось. Напротив, покрытия из ПЭ интенсивно плавилась, и наблюдалось стекание расплава. Оказалось, что при горении сверху вниз ( $\varphi = -90^\circ$ ) покрытия из ПЭ горят в 3,5–4,5 раза быстрее, чем покрытия из ПММА, так как течение расплава ПЭ интенсифицирует теплопередачу от факела пламени к свежему образцу. Напротив, при горении снизу вверх ( $\varphi = +90^\circ$ ) покрытия из ПЭ горят вдвое медленнее, чем аналогичные покрытия из ПММА, поскольку расплав ПЭ стекает в сторону, противоположную направлению горения, что приводит к теплопотерям и снижению скорости пламени.

## ВЫВОДЫ

1. Определен нижний предел горения по давлению газообразного окислителя ( $O_2-Ar$ ) для пластин титана (сплав ОТ-4). Значение предела  $p_l$  монотонно уменьшается по мере увеличения концентрации кислорода в смесях  $O_2-Ar$ . При увеличении толщины образца величина  $p_l$  возрастает.

2. В смеси 75 %  $O_2 + 25$  %  $Ar$  измерена скорость распространения пламени по поверхности указанных выше образцов. Скорость пламени уменьшается при увеличении в определенном интервале толщины образца, что характерно для диффузионного горения твердых горючих. Показатель степени  $n$  в формуле  $w = A_2/\Delta^n$  для исследованных в настоящей работе плоских образцов титана оказался существенно ниже, чем аналогичный показатель для стержней из мягкой стали (по литературным данным) — тем в большей степени, чем выше давление. С ростом давления скорость пламени возрастает. При этом показатель степени  $\nu$  в формуле  $w = Azp^\nu$  для изученных образцов титана оказался существенно выше, чем для исследованных в литературе стержней из мягкой стали.

3. При горении образцов титана в смеси 75 %  $O_2 + 25$  %  $Ar$  наблюдаются образование, рост и падение капель расплава, что характерно для случая, когда температура плавления металла ниже температуры его горения. Проанализирован вопрос о влиянии течения расплава на скорость горения образцов твердых горючих.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-03-32039а).

## ЛИТЕРАТУРА

- Бахман Н. Н., Кузнецов Г. П., Пучков В. М. Исследование критических условий горения прессованных образцов титана. *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 3. С. 50–55.
- Иванов Б. А. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. 2-е изд. М.: Химия, 1984.
- Борисова Е. А., Верникова Н. Г., Ефимов Б. Г. и др. Влияние состава титановых сплавов на характер горения в потоке воздуха // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, № 3. С. 35–40.
- Ефимов Б. Г., Кузьяев П. Н. Некоторые особенности горения металлов в потоке  $N_2 + O_2$  // *Физика горения и взрыва*. 1994. Т. 30, № 6. С. 68–71.
- Ефимов Б. Г., Кузьяев П. Н. Влияние угла атаки на характеристики горения титановых пластин в потоке воздуха // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31, № 6. С. 37–40.
- Harrison P. L. and Yoffe A. D. The burning of metals // *Proc. Roy. Soc.* 1961. V. A261. P. 357–370.
- Bakhman N. N. Main factors influencing flame spread velocity over polymer surfaces // *Polymer Yearbook 13*. Harwood Academic Publishers, 1996. P. 191–217.
- Sato J., Sato K., and Hirano T. Fire spread mechanisms along steel cylinders in high pressure oxygen // *Combust. Flame*. 1983. V. 51, N 3. P. 279.
- Steinberg T. A., Wilson D. W., and Benz F. The burning of metals and alloys in microgravity // *Combust. Flame*. 1992. V. 88, N 3-4. P. 309–320.
- Иванов Б. А., Измайлов Е. М., Наркунский С. Е. и др. Распространение горения по цилиндрическим образцам из алюминиевых сплавов и некоторые особенности горения алюминия // *Физика горения и взрыва*. 1971. Т. 7, № 4. С. 548.
- Беляев А. Ф., Кондрашков Ю. А. О максимуме скорости горения пикрата калия при изменении давления // *Докл. АН СССР*. 1960. Т. 131. С. 364.
- Bakhman N. N., Aldabaev L. I., Kondrikov B. N., et al. Burning of polymeric coatings on copper wires and glass threads: 1. Flame propagation velocity // *Combust. Flame*. 1981. V. 41, N 1. P. 17–34.

Поступила в редакцию 28/IV 1998 г.,  
в окончательном варианте — 14/II 2000 г.