

Рис. 3. Конфигурации диффузионных факелов.
1 — $d=1$ или $u_1=0$; 2 — $d=1,5$, $u_1=0,5$; 3 — $d=2$, $u_1=0,5$; 4 — $d=2$, $u_1=1$.

длины факелов. Это связано с тем, что с увеличением параметра спутности или значения d градиент концентрации топлива $\left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=y_{\Phi}}$ увеличивается. При постоянном значении коэффициента диффузии D это приводит к росту потока топлива $j|_{y=y_{\Phi}} \sim D \cdot$

$\left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=y_{\Phi}}$ к фронту пламени и соответственно к возрастанию напряженности горения (сокращению длины факела). Как известно, в турбулентном коаксиальном факеле наблюдается другая зависимость длины факела от указанных параметров [3], которая обусловлена свойствами турбулентного смешения, и в частности зависимостью коэффициента турбулентной диффузии от градиента скоростей потока. Экспериментальные данные [4] указывают на качественное отличие зависимостей длин ламинарного и турбулентного диффузионных факелов от параметра спутности. Рост параметра спутности u_1 приводит к монотонному убыванию длины ламинарного диффузионного факела (результаты получены для значений $u_1 < 1$ и $u_1 > 1$).

Таким образом, влияние некоторых режимных параметров в диффузионном факеле (в частности, в коаксиальном) при ламинарном и турбулентном режимах течения имеет качественно различный характер.

Поступила в редакцию
19/XII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Е. Джаугаштин, А. Л. Ярин. ФГВ, 1978, 14, 3.
2. Л. Ю. Артюх, Л. А. Вулис, Э. А. Закарин. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
3. Л. А. Вулис, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярин. Основы теории газового факела. Л., «Энергия», 1968.
4. B. J. Hill, K. Holmes, D. G. Martin. Fuel, 1972, 51, 3, 202.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ГАФНИЯ, НИОБИЯ И ТАНТАЛА С КРЕМНИЕМ

А. Р. Саркисян, С. К. Долуханян, И. П. Боровинская

(Ереван)

В работе [1] изучены некоторые закономерности горения в системах молибден — кремний, титан — кремний, цирконий — кремний и рассмотрены условия образования в этих системах различных силицидов. В указанных системах горение в самораспространяющемся режиме лег-

Т а б л и ц а 1

Состав шихты	Массовая доля Si, %	Фазовый состав продукта	T_n , К	T_r , К
Nb+0,2Si	5,7	Nb; Nb ₅ Si ₃ *	1053	—
Nb+0,25Si	7,0	Nb; Nb ₅ Si ₃ *; Si; NbSi ₂	1043	1303
Nb+0,3Si	9,16	Nb; Si; Nb ₅ Si ₃ *; NbSi ₂	973	1373
Nb+0,5Si	13,1	Nb; Nb ₅ Si ₃ *; NbSi ₂	793	1623
Nb+0,6Si	15,4	NbSi ₂ ; Nb ₅ Si ₃ *; Nb	723	1853
Nb+1,0Si	23,2	NbSi ₂ ; Nb; Nb ₅ Si ₃ *	623	1823
Nb+1,5Si	31,2	NbSi ₂ ; Nb ₅ Si ₃ ; Nb	593	1723
Nb+2,0Si	37,7	NbSi ₂ ; Nb	523	1953
Nb+3,0Si	47,6	NbSi ₂ ; Si	1223	1643
Nb+4,0Si	54,2	NbSi ₂ ; Si; Nb	1253	—
Hf+0,3Si	4,5	Hf; Hf ₂ Si; HfSi; Hf ₃ Si ₂ ; Hf ₅ Si ₃	1173	—
Hf+0,5Si	7,3	HfSi; Hf ₅ Si ₃ ; Hf ₃ Si ₂ ; Hf; Hf ₂ Si	523	1443
Hf+0,6Si	8,7	HfSi; Hf ₅ Si ₃ ; Hf ₃ Si ₂ ; Hf; Hf ₂ Si	423	1623
Hf+0,8Si	11,2	HfSi; Hf ₅ Si ₃ ; Hf ₃ Si ₂ ; Hf	393	1523
Hf+1,0Si	13,6	HfSi; Hf; HfSi ₂ (следы)	373	1673
Hf+1,5Si	19,1	HfSi ₂ ; HfSi; Hf ₅ Si ₃ ; Hf ₃ Si ₂ ; Hf	393	1423
Hf+2,0Si	23,9	HfSi ₂ ; HfSi; Hf ₅ Si ₃ ; Hf ₃ Si ₂ ; Hf; Si	403	1653
Hf+3,0Si	32,1	HfSi ₂ ; Si; Hf ₅ Si ₃ (сл.); Hf ₃ Si ₂ (сл.)	673	1493
Hf+4,0Si	38,6	HfSi ₂ ; Hf; Si	1023	1323
Ta+0,2Si	3,0	Ta ₃ (Ta _{0,28} Si _{0,72}); Ta ₂ Si; Ta; Ta ₁ Si; Ta ₅ Si ₃ ** (следы)	873	—
Ta+0,3Si	4,4	Ta ₂ Si; Ta ₅ Si ₃ **; Ta ₃ (Ta _{0,28} Si _{0,72}); Ta; Ta ₃ Si (следы)	723	1273
Ta+0,5Si	7,2	Ta ₅ Si ₃ **; Ta ₂ Si; Ta ₃ (Ta _{0,28} Si _{0,72}); TaSi ₂ (сл.); Ta (сл.)	703	1473
Ta+0,6Si	8,5	Ta ₅ Si ₃ **; Ta ₂ Si; Ta ₃ (Ta _{0,28} Si _{0,72}); TaSi ₂ ; Ta	693	1573
Ta+1,0Si	13,4	Ta ₅ Si ₃ **; TaSi ₂	573	1373
Ta+1,5Si	18,8	TaSi ₂ ; Ta ₅ Si ₃ **	523	1673
Ta+2,0Si	23,7	TaSi ₂ ; Ta ₅ Si ₃ **	423	1753
Ta+3,0Si	31,7	TaSi ₂ ; Si; Ta ₅ Si ₃ **	873***	1373
Ta+5,0Si	43,6	TaSi ₂ ; Si	873***	1073

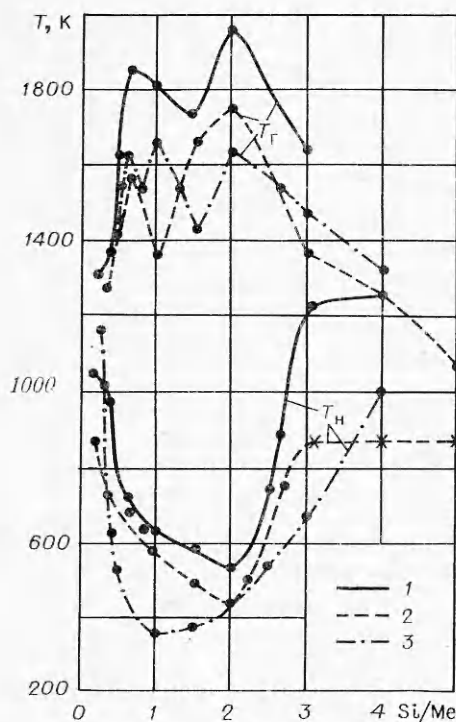
* Имеются две модификации Nb₅Si₃ — высокотемпературная и низкотемпературная.** Имеются три модификации Ta₅Si₃.

*** Самовоспламенение

ко осуществлялось при локальном инициировании при комнатных температурах.

В данной работе изучалось горение систем Hf—Si, Nb—Si, Ta—Si. Для распространения фронта горения в этом случае оказался необходимым предварительный подогрев исходной смеси до 643—1173 К. В связи с этим изучалось влияние предварительного нагрева смесей порошков ниобия, тантала и гафния с кремнием на пределы горения и температуры горения, а также рассмотрены условия образования в этих системах различных силицидов.

Эксперименты проводились в бомбе постоянного давления по методике [2]. Реакционная смесь, помещенная в специальные кварцевые стаканы с электрообогревом, устанавливались в бомбу. Температуры



Зависимость температур предварительного нагрева и горения от соотношения исходных компонентов в системе Nb—Si (1), Ta—Si (2) и Hf—Si (3).

подогрева и горения смесей измерялись вольфрам-рениевой термопарой, помещенной внутрь образца, нагреваемого с постоянной скоростью. Рентгеновский анализ проводился на дифрактометре ДРОН-0,5.

В табл. 1 приведены пределы горения по составу, температуры предварительного подогрева T_n , при которых начинается горение, температуры горения T_g для исследованных систем и фазовый состав продуктов горения.

Видно, что при минимальных температурах предварительного подогрева максимальные температуры развиваются при горении составов Nb+2Si (1953 K), Ta+2Si (1753 K) и Hf+Si (1673 K). Однако при таких T_n продукты получают неоднородными. Для получения одно-

фазных силицидов NbSi₂ и TaSi₂ необходимо несколько повысить температуру подогрева: до 523 и 623 K соответственно. Повышение температур предварительного подогрева также дало возможность намного расширить пределы горения (см. табл. 1) по составу сравнительно с ранее изученными системами металл—кремний.

На рисунке изображены зависимости минимальной температуры подогрева, необходимой для воспламенения систем Nb—Si, Ta—Si и Hf—Si, от соотношения компонентов в исходной смеси. Минимумы кривых T_n для систем Nb—Si и Ta—Si соответствуют Si/Me=2, т. е. ди-силицидам, а для системы Hf—Si — при Si/Me=1. Температуры горения проходят через максимумы, которые соответствуют стехиометрическим составам Nb₅Si₃, Hf₅Si₃, HfSi, HfSi₂, Ta₅Si₃, TaSi₂.

При изменении содержания кремния в исходной смеси в ту или иную сторону от минимумов кривых увеличивается минимальная температура начального подогрева, необходимая для осуществления реакции в самораспространяющемся режиме. Из всех ранее рассмотренных систем [3, 4] силициды переходных металлов имеют наиболее сложные фазовые диаграммы состояния [5]. Рассматриваемые же силициды имеют еще и различные модификации одних и тех же фаз.

Таблица 2

Силицид	Параметры гексагональной кристаллической решетки		Массовый состав, %		
	[7]	эксперимент	Me	Si _{общ}	Si _{своб}
NbSi ₂	$a=4,803$ $c=6,604$	$a=4,811$ $c=6,60$	62,30	37,58	0,22
TaSi ₂	$a=4,778$ $c=6,558$	$a=4,781$ $c=6,563$	76,18	23,47	0,29

При рассмотрении данных табл. 1 видно, что в указанных пределах горения систем Hb—Si, Ta—Si и Hb—Si получаются все фазы, известные по диаграммам состояния, в том числе высокотемпературные, такие как Nb_5Si_3 , Ta_5Si_3 [6], которые образуются при более высоких температурах, чем это имеет место при горении соответствующих составов. Такое явление довольно трудно объяснить, но, возможно, оно связано с некоторой ошибкой в измерении температур, либо с особенностями фазовых переходов в режиме горения. Этот факт представляет большой интерес для дальнейшего изучения. Некоторые характеристики однофазных силицидов, полученных в данной работе, приведены в табл. 2.

Поступила в редакцию
22/VII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Р. Саркисян, С. К. Долуханян и др. ФГВ, 1978, 14, 3.
2. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1972, 204, 2.
3. И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1974, 10, 1.
4. В. М. Шкиро, И. П. Боровинская.— В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1975.
5. А. С. Бережной. Кремний и его бинарные системы. Киев, Изд-во АН УССР, 1958.
6. Х. Дж. Гольдшидт. Сплавы внедрения. Т. 2. М., «Мир», 1971.
7. Г. В. Самсонов, И. М. Виницкий. Тугоплавкие соединения. М., «Металлургия», 1976.

ОБЛАСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ТВЕРДОГО МАТЕРИАЛА

*М. А. Гликин, Л. М. Савицкая, Д. Е. Бражник,
В. Е. Овчаренко, Н. П. Алексеева*

(Северодонецк)

В литературе отсутствуют сведения о теоретических и экспериментальных работах, посвященных исследованию области гашения и распространения пламени в псевдоожигенном слое твердого материала. В то же время в некоторых работах, например [1], имеются утверждения, что осуществление реакции в аппарате с псевдоожигенным слоем катализатора исключает возможность взрыва. Это положение находится в противоречии с известным фактом интенсификации процесса горения в псевдоожигенном слое [2].

Рассмотрение теории пределов распространения пламени и псевдоожигения позволяет предположить, что в псевдоожигенном слое в определенных условиях, благодаря интенсификации процессов тепло- и массопередачи, будут затруднены условия распространения пламени. Так как чисто теоретическое рассмотрение этого положения в настоящее время не представляется возможным, проведено экспериментальное исследование области распространения пламени в условиях псевдоожигения. Эксперименты проводились на установках с диаметром основного аппарата 50 и 100 мм при высоте псевдоожигенного слоя $100 \div 150$ мм.